

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. R. COPPENS

PREMIÈRE THÈSE. — Étude de la radioactivité de quelques roches par l'émulsion photographique.

DEUXIÈME THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

soutenues le 19 décembre 1949 devant la commission d'examen

M^{me} JOLIO-CURIE.

Président.

M. BARRABÉ.....

M. WYART.....

M. ORCEL.....

M. DEMAY.....

} *Examineurs.*

PARIS

LIBRAIRIE MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 120

1949

ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ
DE QUELQUES ROCHES
PAR L'ÉMULSION PHOTOGRAPHIQUE

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen..... M. A. CHATELET.

PROFESSEURS

G. JULIA.....	T	Analysesupérieure etAlgèbre supérieure.	PIVETEAU.....	T	Géologie.
A. DENJOY.....	T	Théorie des fonctions.	ROCARD.....	T	Physique.
L. LUTAUD.....	T	Géographie physique etGéologie dynamique.	H. CARTAN.....	T	Mathématiques gé-nérales.
E. DARMOIS.....	T	Enseignement de Phy-sique.	SCHAEFFER.....	T	Physiologie des fonc-tions.
Robert LÉVY.....	T	Physiologie comparée.	LAFFITTE.....	T	Chimie (P. C. B.).
Henri VILLAT.....	T	Mécanique des fluides et applications.	FAVARD.....		Calcul des Probabilités et Physique Mathém.
Ch. JACOB.....	T	Géologie.	COULOMB.....	T	Physique du Globe.
P. PASCAL.....	T	Chimie générale.	M ^{lle} COUSIN.....	T	Biologie an. (P. C. B.).
M ^{me} RAMART-LU-CAS.....	T	Chimie organique.	CHRÉTIEN.....		Chimie (P. C. B.).
FOCH.....	T	Mécanique physique et expérimentale	P. DRACH.....		Zoologie.
PAUTHENIER.....	T	Électrotechnique gé-nérale.	KASTLER.....		Physique.
DE BROGLIE.....	T	Théories physiques.	CHATELET.....	T	Arithmétique et théorie des nombres.
JOB.....	T	Chimie générale.	EPHRUSSI.....	T	Génétique.
PRENANT.....	T	Anatomie et Histologie comparées.	WURMSER.....	T	Biologie physico-chi-mique.
COMBES.....	T	Physiologie végétale.	BAUER.....	T	Chimie-Physique.
GARNIER.....	T	Géométrie supérieure.	RIVIÈRE.....		Géologie (P. C. B.).
PÈRES.....	T	Mécanique rationnelle.	GAUTHIERET.....		Biologie végétale (P. C. B.).
HACKSPILL.....	T	Chimie minérale.	LUCAS.....		Physique.
LAUDIER.....	T	Physiologie générale.	A. THOMAS.....		Évolution des êtres or-ganisés.
TOUSSAINT.....	T	Technique Aéronau-tique.	ARNULF.....		Optique appliquée.
M. CURIE.....	T	Physique (P. C. B.)	MAX MORAND.....		Physique.
G. RIBAUD.....	T	Hautes températures.	SOLEILLET.....		Physique.
CHAZY.....	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	FORTIER.....	T	Mécanique -expérimen-tale des fluides.
CROZE.....	T	Physique théorique et Physique céleste.	DANJON.....	T	Astronomie.
DUPONT.....	T	Théories chimiques.	FROMAGEOT.....		Chimie biologique.
VALIRON.....	T	Calcul différentiel et Cal-cul intégral.	LAPORTE.....		Physique générale et Radioactivité.
BARRABÉ.....	T	Géologie structurale et Géologie appliquée.	JANET.....		Mathématiques gé-nérales
VAVON.....	T	Analyse et mesures chi-miques.	PETIT.....	T	Biologie maritime.
G. DARMOIS.....	T	Calcul des probabilités et Physique mathéma-tique.	QUENEY.....	T	Météorologie et dyna-mique atmosphérique.
Jacques BOUR-CARD.....		Géographie physique et Géologie dynamique.	GALLIEN.....		Biologie animale (P. C. B.).
AUBEL.....	T	Chimie biologique.	EICHORN.....		Biologie végétale (P. C. B.).
M ^{me} JOLIOT-CURIE	T	Physique générale et Radioactivité.	DE CUGNAC.....		Biologie végétale (P. C. B.).
PLANTFOL.....	T	Botanique.	LAVAL.....		Physique (P. C. B.).
CABANNES.....	T	Recherches physiques.	M ^{lle} CAUCHOIS.....		Chimie-Physique.
GRASSÉ.....	T	Évolution des êtres or-ganisés.	THELLIER.....		Physique du Globe.
PRÉVOST.....	T	Chimie organique.	AUDUBERT.....		Electrochimie.
BOULIGAND.....	T	Application de l'analyse à la géométrie.	L'HÉRITIER.....		Génétique.
CHAUDRON.....	T	Chimie appliquée.	GRIVET.....	T	Radio-électricité.
WYART.....	T	Minéralogie.	PONCIN.....		Mécanique des Fluides.
TEISSIER.....	T	Zoologie.	THIRY.....	T	Mécanique Appliquée.
MANGENOT.....	T	Biologie végétale.	DUBREIL.....		Mathématiques gé-nérales
P. AUGER.....	T	Physique quantique et relativité.	QUELET.....		Chimie (P. C. B.).
MONNIER.....		Physiologie générale.	CAGNIARD.....		Géophysique appliquée.
			CHAMPETIER.....		Chimie appliquée.
			CUVILLIER.....		Géologie structurale et Géologie appliquée.
			JUNG.....		Pétrographie.
			TRILLAT.....		Physique (P. C. B.).
			WIEMANN.....		Chimie (P. C. B.).

Secrétaire..... CH. MONIER.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. R. COPPENS

PREMIÈRE THÈSE. — Étude de la radioactivité de quelques roches par l'émulsion photographique.

DEUXIÈME THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

soutenues le 19 décembre 1949 devant la commission d'examen

M ^{me} JOLIOT-CURIE.	<i>Président.</i>
M. BARRABÉ.....	} <i>Examineurs.</i>
M. WYART.....	
M. ORCEL.....	
M. DEMAY.....	

PARIS

LIBRAIRIE MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 120

1949



A MON MAÎTRE :

MADAME IRÈNE JOLIOT-CURIE,
PRIX NOBEL,
PROFESSEUR A LA SORBONNE.

*Hommage de ma
respectueuse reconnaissance.*

A MA FEMME,

A MES ENFANTS YVES ET ODILE.

*En témoignage
d'une profonde affection.*

ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ DE QUELQUES ROCHES PAR L'ÉMULSION PHOTOGRAPHIQUE

PAR RENÉ COPPENS,
Professeur au Lycée de Vannes.

Sommaire. — Emploi de l'émulsion photographique pour l'étude de la radioactivité des roches. — Les éléments radioactifs des roches émettent des rayons α dont les trajectoires s'inscrivent dans l'émulsion. — Possibilité de numération des rayons α et de détermination des teneurs en uranium et en thorium.

Étude de la disparition des traces des trajectoires des rayons α et moyens d'y remédier.

Les roches communes examinées (granites, granulites, gneiss, mica-schistes...) ont une concentration en uranium moyenne voisine de 7 à 8 10^{-5} et une concentration en thorium environ 3 fois plus forte.

L'activité de ces roches est due, en majeure partie (60 à 70 %), à des inclusions dont l'étude minéralogique est en cours. Ces inclusions semblent pouvoir se classer en 4 catégories :

- 1° à forte teneur en uranium (70 %);
- 2° à forte teneur en thorium (70 %);
- 3° à faible teneur en uranium (quelques unités pour cent);
- 4° à faible teneur en thorium (1 à 2 %).

La radioactivité de ces inclusions n'est pas uniforme et l'étude des sables met en évidence l'existence de petits grains ayant des teneurs inférieures ou supérieures aux précédentes. D'autre part l'évaluation de la radioactivité globale des sables des plages d'une rivière montre une répartition très irrégulière des éléments actifs.

INTRODUCTION

Le 30 mars 1896, Henri Becquerel découvrit qu'une plaque photographique enveloppée de papier noir était impressionnée lorsqu'elle restait au voisinage d'un sel d'uranium. Ce fut là le point de départ de la découverte de la radioactivité.

Cette action des rayonnements radioactifs sur l'émulsion

photographique est bien connue et de nombreux essais ont été tentés pour l'utiliser dans la numération des particules α . Celles-ci, pénétrant dans une couche sensible ordinaire, produisent, après développement, des files de points noirs qu'on peut reconnaître et compter (1), mais qui sont distants les uns des autres à cause de la grosseur des grains de l'émulsion.

Ces dernières années des recherches furent entreprises (2), en vue d'obtenir des émulsions permettant un meilleur enregistrement. Grâce à l'augmentation de la concentration en bromure d'argent (10 fois plus forte que dans les plaques ordinaires) et à des modifications de la technique de fabrication, on possède actuellement des plaques photographiques sensibles à grains très fins et dont le voile chimique est considérablement réduit.

Il est possible, avec de telles plaques, d'obtenir les traces des trajectoires des particules α . Il suffit de les placer au contact d'un corps radioactif. Après un développement simple, mais qui demande néanmoins quelques précautions, on peut voir sur l'émulsion, par observation au microscope de faible grossissement, des traces en forme de traits rectilignes dont la longueur varie de quelques microns à quelques dizaines de microns (fig. 1). Un grossissement plus fort permet de constater que ces traits sont formés d'une suite de grains d'argent noirs dont le diamètre atteint environ $0,2 \mu$ (3).

Au premier abord, il semble logique d'admettre que le nombre de rayons α inscrits par une substance sur une plaque photographique est proportionnel à sa concentration en matière radioactive et au temps pendant lequel a eu lieu le contact. L'examen d'une plaque impressionnée pendant un temps déterminé doit donc permettre l'évaluation de la teneur d'un minéral.

D'autre part, un corps contenant une très faible proportion de matière radioactive peut donner sur une émulsion un nombre très grand de trajectoires de rayons α à condition de le laisser en contact avec cette émulsion pendant un temps très long. La durée de la pose ne peut être illimitée à cause des contaminations toujours possibles (impuretés contenues dans la

gélatine ou dans le verre, poussières radioactives de l'air...), mais elle peut, dans certaines conditions, atteindre plusieurs mois et l'examen d'un corps d'activité extrêmement faible semble possible.

En nous basant sur les calculs effectués par M^{me} Joliot-Curie (4) et donnant le nombre de particules α visibles émises



FIG. 1. — Une plaque photographique à grains très fins, placée au contact d'un corps radioactif est impressionnée par les rayons α qui sont émis par ce corps. Après développement l'observation au microscope montre une série de traits rectilignes dont la longueur varie de quelques microns à quelques dizaines de microns.

par centimètre carré de surface libre et par seconde par un corps en fonction de sa concentration en matières radioactives et de sa composition, nous nous sommes proposé, dans le travail qui suit :

1° de déterminer expérimentalement la concentration en uranium ou en thorium de quelques minerais connus en évaluant le nombre de particules α émises par centimètre carré et

par seconde et de vérifier les résultats en les comparant à ceux donnés par une autre méthode ;

2° de préciser si un corps radioactif examiné contient de l'uranium ou du thorium ou les deux corps à la fois en mesurant les longueurs des trajectoires des rayons α et, dans le cas où uranium et thorium coexistent, de déterminer le rapport des concentrations de ces deux corps ;

3° d'étudier la faible radioactivité de quelques roches, radio-activité déjà mise en évidence par des méthodes complètement différentes, et de montrer que cette radioactivité est, en majeure partie, concentrée dans des inclusions comme le prouvent diverses études minéralogiques, en particulier celles relatives à la formation des halos pléochroïques.

CHAPITRE I

CALCUL DU NOMBRE DE RAYONS α VISIBLES INSCRITS PAR CENTIMÈTRE CARRÉ ET PAR SECONDE SUR UNE ÉMULSION PHOTOGRAPHIQUE PAR UN CORPS RADIOACTIF

§ 1. — Nombre de rayons α émis par centimètre carré et par seconde par un corps radioactif.

Des formules calculées par Evans (5) permettent d'évaluer le nombre de rayons α émis par centimètre carré et par seconde par un radioélément disposé en couche épaisse et dont on connaît la composition chimique. M^{me} Joliot-Curie (4) a étendu le problème à l'étude des minerais qui contiennent en équilibre soit l'uranium et l'actinium, et leurs dérivés, soit le thorium et ses dérivés, soit les corps des trois séries à la fois.

Nous reprenons ci-après les calculs afin de préciser certaines données qui dépendent du microscope utilisé.

Appelons R le parcours d'une particule α dans l'air à la température de 0° centigrade et sous la pression de 760 mm. de mercure, et R' le parcours de la même particule dans la roche examinée. Nous désignerons par K le rapport

$$K = \frac{R'}{R} = \frac{\text{parcours dans le solide}}{\text{parcours dans l'air}}.$$

Les particules α après avoir traversé une partie du solide pénètrent dans l'émulsion de la plaque photographique et y laissent la trace de leur trajectoire.

Toutes ces trajectoires ne sont pas visibles. En effet, pour qu'elles le soient, elles doivent avoir dans l'émulsion un parcours suffisant. Il faut, par exemple, qu'elles aient dans

cette émulsion un parcours au moins égal à ρ' , ce qui correspond dans l'air à un parcours ρ tel que :

$$K_1 = \frac{\rho'}{\rho} = \frac{\text{parcours dans l'émulsion}}{\text{parcours dans l'air}}.$$

Ce rapport K_1 se détermine facilement. Il suffit de mesurer les trajectoires les plus longues émises par un corps radioactif ne contenant par exemple que de l'uranium et ses dérivés, sans thorium. Les trajectoires les plus longues correspondent aux particules émises par le Ra C'. Elles ont dans l'air un parcours égal à 6,87 cm. L'expérience montre que les

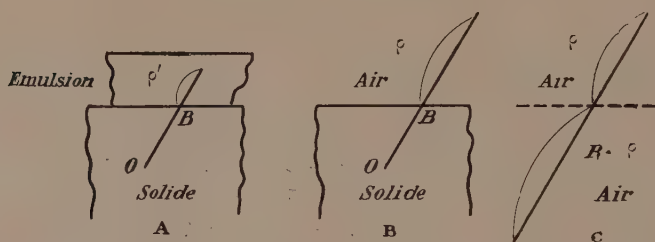


FIG. 2. — Pour qu'une trajectoire de rayon α soit visible dans l'émulsion photographique, elle doit avoir au minimum un trajet ρ' dans cette émulsion (A). Cette longueur ρ' dans l'émulsion correspond à une longueur ρ dans l'air (B). Si R est le parcours total du rayon dans l'air, le parcours dans la roche correspond à un parcours $(R-\rho)$ dans l'air (C).

trajectoires les plus longues tracées dans l'émulsion par la pechblende, la carnotite, l'autunite, la tobernite, tous corps exempts de thorium, mesurent 38μ , donc le rapport $K_1 = 38/68.700$.

Le parcours dans l'air d'une particule visible doit donc être égal à (fig. 2) :

$$\rho = \frac{\rho'}{K_1} = \frac{68.700}{38} \rho'.$$

Son parcours dans la roche doit correspondre à un parcours dans l'air égal à $R-\rho$. Il devra donc être égal à $K(R-\rho)$.

Si une trajectoire fait avec la normale à la surface un angle

θ (fig. 3), elle est visible si elle est issue d'un point O situé à une profondeur AO telle que

$$0 \leq AO \leq K (R - \rho) \cos \theta.$$

En supposant que le corps radioactif émette N particules α par centimètre cube et par seconde, on peut calculer le nombre

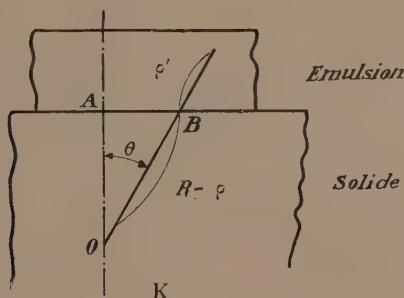


FIG. 3. — Le parcours $(R - \rho)$ dans l'air correspond à un parcours $(R - \rho) K$ dans la roche. K est un coefficient qui dépend de la nature de la roche. Les rayons émis sous un angle θ ne seront visibles que si OA est inférieur à une valeur limite.

n de celles qui émergent par centimètre carré de surface libre et par seconde dans les conditions exigées précédemment.

On trouve :

$$n = \frac{N}{4} K (R - \rho) \text{ avec } \rho = \frac{\rho'}{K_1}$$

d'où

$$n = \frac{N}{4} K \left(R - \frac{\rho'}{K_1} \right).$$

Avec le microscope utilisé, nous avons pu, sans erreur possible, distinguer des trajectoires mesurant 3 μ .

Nous posons donc $\rho' = 3 \mu$.

d'où

$$\rho = (68.700 : 38) \rho' = 5.400 \mu.$$

d'où

$$n = \frac{N}{4} K (R - 0,54 \text{ cm.}).$$

Une roche quelconque contient généralement tous les éléments de la série de l'uranium et de l'actinium ou tous ceux

de la série du thorium et même parfois ceux des 3 séries à la fois.

Les figures 4, 5 et 6 rappellent les familles radioactives avec leurs émissions de rayons α et les parcours dans l'air de chacun d'eux.

La série de l'uranium fournit 8 rayons différents en négligeant les rayons émis par le Ra C'' (0,38 %). La série de l'actinium en fournit 7, ceux de l'actinium C' étant négligés

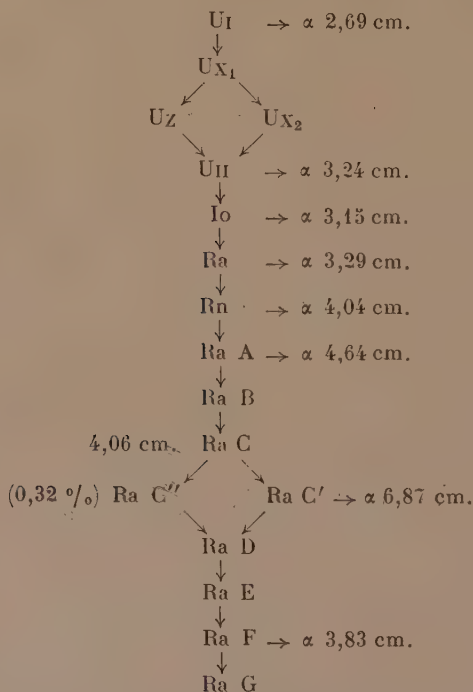


FIG. 4. — Famille radioactive de l'uranium avec indication des rayons α émis et de leur parcours dans l'air.

(0,32 %). La série du thorium en donne 6, étant entendu que la désintégration du thorium C produit soit le rayon du thorium C'' (4,71 cm.), soit le rayon α du thorium C' (8,62 cm.) dans les proportions de 35 % du premier contre 65 % du second.

Si un corps émet N rayons α par centimètre cube et par

seconde, il y aura pour toute une série en équilibre radioactif émission de

$$\frac{N}{4} \sum K (R - \rho)$$

particules α visibles par centimètre carré et par seconde.

K varie très peu d'un corps à l'autre de la série et nous pouvons le considérer comme constant. Le nombre de particules α visibles émises par centimètre carré et par seconde sera donc :

$$\frac{N}{4} K \sum (R - \rho)$$

$\sum (R - \rho)$ étant la somme des longueurs $R - \rho$ étendue à tous les corps d'une série.

Pour la série Uranium-Radium, on a, en tenant compte du fait que $\rho \simeq 0,54$ cm.

$$\text{Uranium I} \quad N_{U I} = \frac{N_u}{4} K (2,69 - 0,54)$$

$$\text{Uranium II} \quad N_{U II} = \frac{N_u}{4} K (3,24 - 0,54)$$

$$\text{Ionium} \quad N_{Io} = \frac{N_u}{4} K (3,15 - 0,54)$$

$$\text{Radium} \quad N_{Ra} = \frac{N_u}{4} K (3,29 - 0,54)$$

$$\text{Radon} \quad N_{Rn} = \frac{N_u}{4} K (4,04 - 0,54)$$

$$\text{Radium A} \quad N_{RaA} = \frac{N_u}{4} K (4,64 - 0,54)$$

$$\text{Radium C'} \quad N_{RaC'} = \frac{N_u}{4} K (6,87 - 0,54)$$

$$\text{Radium F} \quad N_{RaF} = \frac{N_u}{4} K (3,84 - 0,54)$$

ce qui donne au total :

$$N_U = \frac{N_u}{4} K (31,75 - 8 \times 0,54) = \frac{N_u}{4} K. 27,43.$$

N_U représente le nombre de particules α émises par cm^3 et par seconde par l'uranium. On sait que chaque gramme d'uranium émet $n_u = 1,19 \cdot 10^4$ rayons α par seconde. Si d est la densité du solide, 1 cm^3 pèse d grammes et 1 cm^3 d'uranium émet $d \cdot n_u$ particules par seconde. Si le corps radioactif con-

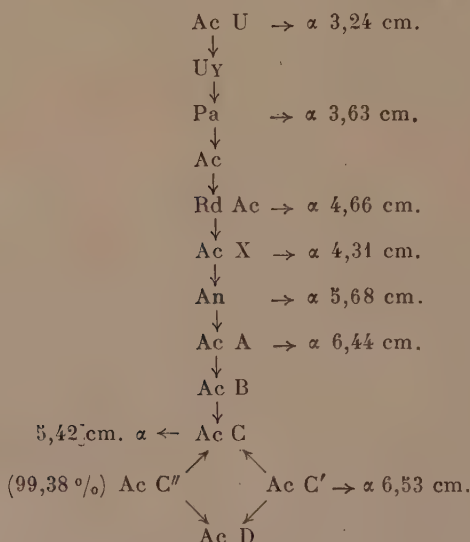


FIG. 5. — Famille radioactive de l'actinium.

tient une concentration en uranium égale à C_u il émet par cm^3

$$N_u = n_u \cdot d \cdot C_u, \text{ soit environ } N_u = 1,2 \cdot 10^4 \cdot d \cdot C_u.$$

Donc le nombre de particules α en provenance de la série de l'uranium, émis par le corps radioactif par cm^3 et par seconde, est :

$$N_u = \frac{1,2 \cdot 10^4}{4} d \cdot C_u \cdot K \cdot 27,43.$$

Pour la série de l'Actinium, on obtient :

$$\text{AcU} \quad N_{\text{AcU}} = \frac{N}{4} K (3,24 - 0,54)$$

$$\text{Ra} \quad N_{\text{Ra}} = \frac{N}{4} K (3,63 - 0,54)$$

$$\text{RdAc} \quad N_{\text{RdAc}} = \frac{N}{4} K (4,66 - 0,54)$$

$$\text{AcX} \quad N_{\text{AcX}} = \frac{N}{4} K (4,31 - 0,54)$$

$$\text{An} \quad N_{\text{An}} = \frac{N}{4} K (5,68 - 0,54)$$

$$\text{AcA} \quad N_{\text{AcA}} = \frac{N}{4} K (6,44 - 0,54)$$

$$\text{AcC} \quad N_{\text{AcC}} = \frac{N}{4} K (5,42 - 0,54)$$

soit au total :

$$N_{\text{Ac}} = \frac{N}{4} K (33,38 - 3,78) = \frac{N}{4} K. 29,60.$$

En tenant compte du rapport entre les concentrations en uranium et en actinium (4 % de ce dernier corps) et de la densité du corps, il s'établit qu'un minerai d'uranium émet par centimètre carré de surface libre et par seconde :

$$N_U = \left(\frac{1,2 \cdot 10^4}{4} d. C_u. K. 27,43 \right) + \left(\frac{1,2 \cdot 10^4}{4} d. \frac{4 C_u}{100} K. 27,60 \right)$$

soit

$N_U = 0,3 \cdot 10^4. d. C_u. K. 28,6$

Pour la série du Thorium, on a :

$$\text{Th} \quad N_{\text{Th}} = \frac{N}{4} K (2,84 - 0,54)$$

$$\text{RdTh} \quad N_{\text{RdTh}} = \frac{N}{4} K (3,96 - 0,54)$$

$$\text{Th X} \quad N_{\text{Thx}} = \frac{N}{4} K (4,26 - 0,54)$$

$$\text{Tn} \quad N_{\text{Tn}} = \frac{N}{4} K (4,99 - 0,54)$$

$$\text{Th A} \quad N_{\text{ThA}} = \frac{N}{4} K (5,62 - 0,54)$$

$$\text{Th } C'' \quad N_{\text{Th}C''} = \frac{N}{4} K (4,71 - 0,54). 0,35$$

$$\text{Th } C' \quad N_{\text{Th}C'} = \frac{N}{4} K (8,62 - 0,54). 0,65$$

soit au total :

$$N_{\text{Th}} = \frac{N}{4} K (23,91 - 3,24) = \frac{N}{4} K. 25,67.$$

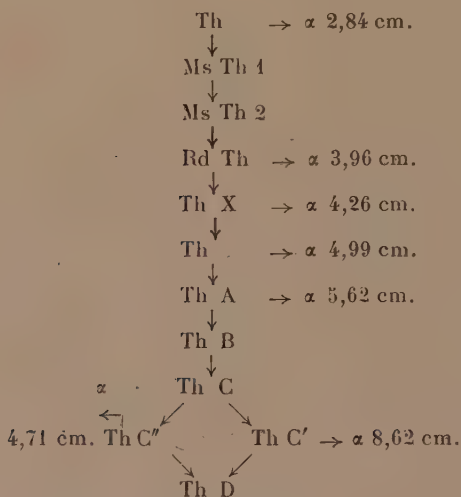


FIG. 6. — Famille radioactive du thorium.

N étant le nombre de rayons α émis par cm^3 de thorium et par seconde. Le thorium pur émet $0,3.10^4$ rayons par gramme et par seconde. Si d est la densité du corps et C_{Th} la concentration en thorium :

$$N_{\text{Th}} = 0,3. 10^4. d. C_{\text{Th}}$$

d'où le nombre de rayons α visibles émis par centimètre carré et par seconde :

$$N_{\text{Th}} = \frac{0,3. 10^4}{4} d. C_{\text{Th}}. 25,67$$

§ 2. — Évaluation du coefficient d'absorption.

Soient R' et R les parcours d'un rayon α dans la roche considérée et dans la matière de comparaison (air), d' et d les densités de ces matières, A' et A les poids atomiques, le pouvoir d'arrêt atomique relatif est donné par

$$s = \frac{R}{R'} \cdot \frac{d}{d'} \cdot \frac{A'}{A}.$$

Le pouvoir d'arrêt d'une molécule s'obtient par addition des pouvoirs d'arrêt des atomes.

On en tire
$$k = \frac{R'}{R} = \frac{\frac{d}{A}}{\frac{d'}{A'} s};$$

Pour l'air le poids spécifique à 0° est $1,29 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$. Dans les conditions ordinaires (température voisine de 15°) $a = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$. En considérant l'air comme formé d'atomes de poids atomique 14,4, on tire :

$$K = \frac{\frac{1,22 \cdot 10^{-3}}{14,4}}{\frac{d'}{A'} s} = \frac{0,85 \cdot 10^{-4}}{\frac{d' s}{A'}}.$$

Si dans 1 cm^3 de matière examinée, il y a une concentration C_1 d'un corps de poids atomique A_1 et de pouvoir d'arrêt s_1 , une concentration C_2 d'un corps de poids atomique A_2 et de pouvoir d'arrêt $s_2 \dots$, etc., on aura :

$$K = \frac{0,85 \cdot 10^{-4}}{d' \sum \frac{C_i s_i}{A_i}}.$$

D'après Bragg et Kleeman, s est proportionnel à $\sqrt{A}$, mais cette loi n'est qu'une loi approchée, aussi préfère-t-on déterminer le pouvoir absorbant de chaque atome par des méthodes expérimentales.

En résumé, un corps qui ne contient que de l'uranium émet par seconde et par cm^2 :

$$N_U = 8,58. 10^4 d. C_u \frac{0,85. 10^{-4}}{d \sum \frac{C_s}{A}} .$$

Un corps qui ne contient que du thorium émet par seconde et par cm^2 :

$$N_{Th} = 1,92. 10^4. d. C_u \frac{0,85. 10^{-4}}{d \sum \frac{C_s}{A}} .$$

En posant $K' = \frac{0,85}{\sum \frac{C_s}{A}}$ il vient :

$$N_U = 8,58 C_u K'$$

$$N_{Th} = 1,92 C_{Th} K'$$

Si le corps contient à la fois de l'uranium et du thorium, il y aura par cm^2 et par seconde, émission de

$$N = (8,58 C_u + 1,92 C_{Th}) K'$$

§ 3. — Évaluation du rapport des concentrations en thorium et en uranium.

Si le corps considéré contient à la fois du thorium et de l'uranium, les rayons les plus longs émis par ce corps sont ceux du thorium C' (8,57 cm.), du radium C (6,91 cm.), de l'actinium A (6,47 cm.) et du thorium A (5,64 cm.).

Nous avons vu que le nombre des rayons α qui ont dans l'air après leur sortie de l'émetteur un parcours égal à ρ et qui sont émis par cm^2 et par seconde est :

$$n = \frac{N}{4} K (R - \rho).$$

Les rayons qui ont dans l'air un parcours supérieur à 7 cm. sont certainement ceux du thorium C'. Leur nombre est :

$$\nu_1 = 0,65 \frac{N_{Th}}{4} K (8,57 - 7) = 0,65 \frac{N_{Th}}{4} K. 1,57 = 0,25 N_{Th} K.$$

Ceux dont les parcours dans l'air sont compris entre 5,8 cm. et 7 cm. sont soit ceux du thorium C' qui ont été partiellement absorbés par le corps avant leur entrée dans l'émulsion, soit ceux du radium C' ou de l'actinium A.

Leur nombre est ν_2 tel que :

$$\begin{aligned} \nu_1 - \nu_2 = 0,65 \frac{N_{Th}}{4} K (8,57 - 5,8) + \frac{N_U}{4} K (6,91 - 5,8) + \\ + \frac{N_U}{4} K \frac{4}{100} (6,46 - 5,8) \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \nu_2 = (0,65 \frac{N_{Th}}{4} K. 1,2) + \left(\frac{N_U}{4} K. 1,1 \right) + \frac{N_U}{4} K. 0,03 = \\ = \frac{K}{4} (0,78 N_{Th} + 1,14 N_U) \end{aligned}$$

d'où

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = 0,8 + 1,1 \frac{N_U}{N_{Th}} = 0,8 + 3,3 \frac{C_U}{C_{Th}}$$

et finalement :

$\frac{C_{Th}}{C_U} = \frac{3,3}{\frac{\nu_2}{\nu_1} - 0,8}$
--

La mesure ne pourra donner de résultats acceptables que lorsque le nombre de trajectoires sera suffisamment grand, car elle ne tient compte que des trajectoires les plus longues. On pourra dans certains cas se contenter de mesurer les trajectoires émises parallèlement à la surface de l'émulsion. Plus souvent il sera nécessaire de mesurer celles qui font avec cette surface un angle plus petit qu'une limite donnée. Il est évident que le résultat n'en sera pas modifié, mais certaines précautions devront être prises pour évaluer la longueur des trajectoires obliques.

CHAPITRE II

EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES

§ 4. — Méthode générale.

Avant d'étudier la radioactivité des roches, nous avons voulu nous rendre compte de la valeur de la méthode et de la meilleure technique à suivre. Quelques expériences ont été conduites dans ce but.

Comme nous avions l'intention d'utiliser des corps pulvérisés, il nous a fallu voir si la grosseur des grains n'avait pas d'influence sur le nombre des particules α comptées. Ensuite, il était intéressant de vérifier si ce nombre était proportionnel au temps. Enfin, nous devons comparer nos mesures à celles fournies par d'autres méthodes.

Ces premières expériences ont été faites avec des plaques Ilford, Concentrated half-tone type B, 20 μ et 40 μ .

Au début, nous posions la plaque sur la matière pulvérisée répartie en une couche à peu près uniforme et nous la pressions avec un poids de l'ordre de 50 à 100 grammes. Avec cette façon d'agir, de nombreux grains de matière adhéraient à l'émulsion et gênaient considérablement l'observation. Un lavage à l'eau courante ne réussissait pas à les enlever et une légère friction avec un coton humide avait l'inconvénient de rayer la gélatine. Pour éviter ces ennuis, il nous a semblé préférable d'agir ainsi : le minéral pulvérisé était projeté de façon aussi régulière que possible sur un carton enduit d'une mince couche de solution de gomme arabique. Celle-ci, en séchant, retenait les grains qui, de ce fait, ne se collaient plus à la couche sensible. Notons que les plaques récentes sont moins sensibles aux actions mécaniques et supportent très bien un lavage au coton humide, ce qui dispense de l'emploi d'un frottis.

Le développement s'est effectué, comme pour toutes les

expériences suivantes, à l'obscurité totale ou à la lumière rouge sombre avec le révélateur Ilford I-D 19. Le fixage s'est fait à l'hyposulfite de sodium.

Nous avons généralement utilisé, pour ces expériences préliminaires, des corps fortement radioactifs et les poses ont varié de quelques minutes à quelques heures. La plaque une fois développée, nous avons compté le nombre de trajectoires visibles par champ de microscope. Nous avons établi une moyenne en examinant une centaine de champs pris au hasard. La répartition uniforme de la radioactivité des minéraux choisis nous a donné à peu près le même nombre de trajectoires dans chaque champ et la moyenne a pu s'établir dans de bonnes conditions. Très souvent en partant de cette valeur, nous avons déterminé le nombre N de rayons α émis par cm^2 et par seconde.

§ 5. — Influence de la grosseur des grains.

Comme nous n'avions pas à notre disposition de tamis convenables, nous avons séparé les poudres des minerais en deux parties par décantation : l'une formée de grains très gros, l'autre formée de grains très fins. Les poses faites pendant des temps égaux avec les différentes poudres ainsi obtenues ont donné les résultats suivants :

NATURE DU MINÉRAI	NOMBRE MOYEN DE TRAJECTOIRES PAR CHAMP		DIFFÉRENCES
	GROS GRAINS	GRAINS FINS	
Oxyde d'urane	35,5	38,5	+ 8 %
—	32,27	32,07	— 0,6 %
—	49,08	50,60	+ 2 %
Pechblende Congo.....	12,50	12,40	— 0,8 %
Minéral non ident.....	28,12	27,66	— 1,5 %

Les résultats semblent donc montrer que la grosseur des grains n'a aucune influence ou, du moins, si elle existe, elle est inférieure aux erreurs statistiques de la numération.

§ 6. — Influence du temps de pose.

Nous avons impressionné deux séries de plaques, l'une avec de la pechblende du Congo, l'autre avec un minerai faiblement radioactif en posant des temps variables t . Nous avons ensuite évalué comme précédemment le nombre moyen n de trajectoires visibles par champ, puis nous avons établi le rapport n/t . Les résultats sont consignés dans les 2 tableaux suivants.

I. — *Pechblende du Congo.*

TEMPS DE POSE t (EN MINUTES)	NOMBRE MOYEN DE TRAJECTOIRES VISIBLES PAR CHAMP n	$\frac{n}{t}$	ÉCARTS PAR RAPPORT A LA MOYENNE
1.....	6,4	6,4	5,2 %
2.....	12,4	6,2	1,6 %
3.....	18,8	6,27	0,5 %
4.....	26,4	6,60	4,8 %
5.....	32,2	6,4	1,6 %
7.....	44,0	6,3	0 %
8.....	49,6	6,2	1,6 %
9.....	55,0	6,1	3,2 %
10.....	64,0	6,4	1,5 %
Moyenne de n/t 6,3			

II. — *Minerai peu actif.*

t (EN HEURES)	n	$\frac{n}{t}$	ÉCARTS
20.....	5,38	0,269	0,4 %
48.....	13,08	0,272	1,3 %
72.....	19,14	0,265	0,8 %
Moyenne de n/t 0,269			

On voit, d'après ces résultats que le nombre de rayons α inscrits sur la plaque est proportionnel au temps. Nous

devions, par des expériences ultérieures, constater que cela n'est vrai que lorsque la durée de pose n'excède pas une certaine valeur variable d'ailleurs avec les conditions de conservation des plaques et de la nature de l'émulsion.

§ 7. — Influence de l'activité du minéral.

Nous avons obtenu, à l'Institut du Radium, une série de minerais d'activités diverses. Ces minerais ne sont pas purs. Lorsque nous écrivons par exemple Carnotite, il ne s'agit pas d'une carnotite pure mais d'un minéral brut contenant une quantité plus ou moins grande de carnotite. Ces activités ont été mesurées par rapport à l'étalon d'oxyde d'urane par la méthode d'ionisation. Les formules d'Evans montrent que si ρ est petit par rapport aux parcours, le rapport des activités mesurées par numération est sensiblement égal au rapport des activités mesurées par ionisation. Nous avons voulu vérifier ce fait. Pour cela, nous avons déterminé par la méthode habituelle le nombre n de trajectoires données par champ et par minute par tous les corps à étudier, y compris l'oxyde d'urane. Ce dernier donne par champ et par minute 0,86 trajectoires. Le rapport $n/0,86$ doit correspondre à l'activité mesurée par rapport à l'étalon d'oxyde d'urane. Le tableau suivant (p. 236), permet de comparer les résultats obtenus par les deux méthodes.

Les résultats obtenus montrent que la numération des rayons α par la plaque photographique permet d'évaluer l'activité d'un minéral avec une précision moyenne de l'ordre de 10 %.

Cependant, dans le tableau précédent, les résultats ont été classés par ordre d'activités décroissantes et il est facile de constater que l'erreur commise augmente en général lorsque l'activité diminue, c'est-à-dire lorsque le temps de pose augmente. On peut aussi remarquer que l'activité calculée est presque toujours inférieure à l'activité mesurée.

Ceci, ajouté à d'autres observations personnelles et à celles d'autres auteurs, nous a amené à conclure que lorsque le temps

de pose est assez long le nombre des trajectoires visibles n'est plus exactement proportionnel au temps. L'image latente produite par un rayon α ne dure qu'un certain temps et si le développement tarde trop, certaines trajectoires ne peuvent être enregistrées. C'est le phénomène auquel on devait donner le nom de « fading », et que nous étudierons dans le chapitre IV.

NATURE DU CORPS	NOMBRE DE RAYONS VISIBLES PAR CHAMP ET PAR MINUTE	ACTIVITÉ PAR RAPPORT A L'ÉTALON D'OXYDE D'URANE		ÉCART %
		CALCULÉE	MESURÉE	
Oxyde d'urane	0,86			
Pechblende Congo...	4,02	4,67	4,54	+ 3
Non identifié.....	3,33	4,10	4,34	+ 6
Pechbl. Cornouailles.	2,74	3,18	2,95	+ 8
Carnotite	0,988	1,14	1,19	+ 4
Non identifié.....	1,06	1,24	1,43	+ 3
—	1,11	1,30	1,34	+ 13
—	0,75	0,87	0,87	0
Autunite Tonkin.....	0,57	0,66	0,65	+ 1,5
Thorite.....	0,50	0,58	0,65	+ 5
Carnotite Colorado..	0,38	0,44	0,51	+ 12
Pechblende Portugal.	0,35	0,40	0,46	+ 14
Non identifié.....	0,28	0,33	0,39	+ 17
—	0,24	0,28	0,31	+ 9
—	0,20	0,23	0,23	0
—	0,11	0,13	0,15	+ 13
—	0,0044	0,00051	0,006	+ 15
—	0,0008	0,00093	0,001	+ 7
—	0,004	0,00047	0,0006	+ 21

Pour cette raison, les premiers essais d'étude de radioactivité des roches ont complètement échoué. Plusieurs plaques posées pendant plus de 3 mois sur des granites et des granulites dont les teneurs en uranium et en thorium sont de l'ordre de $C_U = 10^{-5}$ et $C_{Th} = 3.10^{-5}$ devaient, après développement, montrer environ de 5 à 10 trajectoires de rayons α par champ. Or l'examen des émulsions développées n'a permis de voir que quelques traces isolées.

CHAPITRE III

ÉVALUATION DE LA TENEUR EN URANIUM ET EN THORIUM DE QUELQUES MINERAIS.

INFLUENCE DE CETTE TENEUR SUR L'ABSORPTION

§ 8. — Détermination du coefficient d'absorption.

Pour évaluer la teneur d'un corps radioactif en uranium ou en thorium, il suffit en principe de déterminer le nombre N de trajectoires visibles émises par centimètre carré et par seconde et d'appliquer les formules établies précédemment au chapitre I :

$N = 8,58 C_U K'$ si le corps ne contient que de l'uranium.

$N = 1,92 C_{Th} K'$ si le corps ne contient que du thorium
ou

$N = (8,58 C_U + 1,92 C_{Th}) K'$ s'il contient à la fois de l'uranium et du thorium.

Mais une difficulté se présente, car on ne connaît pas en général la valeur du coefficient

$$K' = \frac{0,85}{\sum \frac{C_s}{A}}$$

qui dépend de la concentration.

Il nous a semblé convenable d'opérer de la façon suivante :

1° nous avons déterminé approximativement le coefficient K' en fonction de la teneur en uranium ou en thorium en supposant le corps composé uniquement d'oxyde des métaux radioactifs et de silice.

2° Nous avons évalué ensuite les produits $C_U K'$ et $C_{Th} K'$ des concentrations et des coefficients d'absorption et nous avons tracé les courbes donnant C_U en fonction de $C_U K'$ et C_{Th} en fonction de $C_{Th} K'$.

3° Les équations citées au début de ce chapitre permettent de calculer

$$C_U K' = \frac{N}{8,58} \text{ et } C_{Th} K' = \frac{N}{1,92}$$

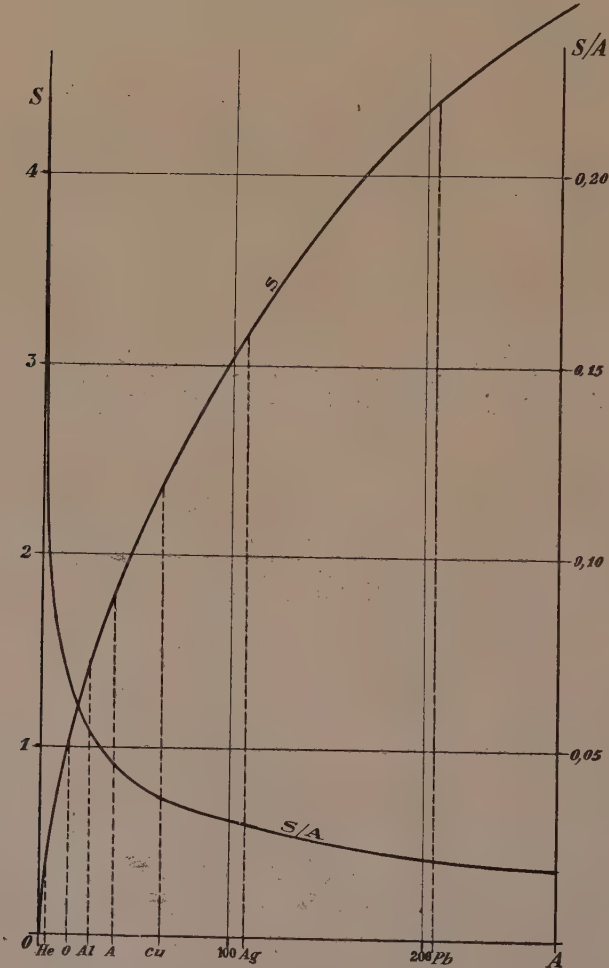


FIG. 7. — Graphique permettant l'évaluation du coefficient d'absorption $K' = 0,85/\Sigma cs/A$. Une courbe donne le pouvoir d'arrêt S en fonction du poids atomique A à partir de quelques résultats expérimentaux. Une deuxième courbe donne les variations du rapport S/A en fonction de A .

et les valeurs ainsi obtenues donnent par lecture du graphique les concentrations en uranium et en thorium.

Le calcul de
$$K' = \frac{0,85}{\sum \frac{C_s}{A}}$$

s'effectue assez rapidement quand on connaît N.

Nous avons vu que d'après Bragg et Kleemann s est proportionnel à $\sqrt{A}$ mais qu'on préférerait utiliser quelques valeurs expérimentales du pouvoir absorbant. Partant de ces valeurs nous avons tracé une courbe donnant s en fonction de A . Sur le même graphique (fig. 7) nous avons dessiné la courbe de $\frac{s}{A}$ en fonction de A , courbe qui simplifie considérablement les calculs.

Pour la construction de ces graphiques nous avons adopté les valeurs suivantes :

CORPS	A	s	s/A	CORPS	A	s	s/A
H.....	1	0,22	0,22	A.....	40	4,90	0,0475
He.....	4	0,35	0,087	Cu....	64	2,3	0,036
O.....	16	1,06	0,066	Ag....	108	3,2	0,030
Al.....	27	1,43	0,036	Pb....	207	4,4	0,021

Il est bien évident qu'en assimilant un minéral quelconque à un mélange d'oxyde d'uranium ou de thorium et de silice, on commet une erreur, car c'est rarement là la composition réelle d'un tel minéral. Cependant, en comparant les résultats ainsi trouvés à ceux obtenus en tenant compte de l'analyse exacte, nous n'avons constaté que des écarts de l'ordre de quelques centièmes sur le coefficient K' .

Aussi une pechblende de Saint-Joachimsthal a (en négligeant les éléments Bi, Zn, Mn, Mg, K... qui n'entrent dans la constitution du minéral que dans des proportions de quelques millièmes), la composition suivante :

U.....	64,7 %	Ca.....	2,2 %
Fe.....	2,8 %	K.....	0,4 %
Si.....	2,5 %	S.....	1 %
Pb.....	4,5 %	Na.....	0,5 %
O		21,4 %	

et le calcul donne $K' = 26,4$.

En considérant ce corps formé de 65 % d'uranium et de 35 % de silice, on arrive à $K' = 25,9$, d'où une différence de 2 %. Nous serons conduits, par la suite, à faire sur K' des approximations bien plus grandes et nous pouvons admettre que nos calculs donnent des résultats assez proches de la réalité. Nous les donnons ci-après :

CONCENTRA- TIONS EN U OU EN Th	CORPS NE CONTENANT QUE DE L'URANIUM		CORPS NE CONTENANT QUE DU THORIUM	
	K'	$C_U \cdot K'$	K'	$C_{Th} K'$
0.....	14,1	0	14,1	0
0,1.....			15,1	1,51
0,2.....			16,3	3,26
0,25.....	16,9	4,2		
0,30.....			17,6	5,28
0,35.....	17,2	6,23		
0,40.....			19,2	7,68
0,50.....	21,4	10,9	21,0	10,5
0,60.....	23,4	14,04	23,4	14,04
0,65.....	24,9	16,18		
0,70.....	26,4	18,5	26,2	18,41
0,76.....	28,6	21,73		
0,80.....	30,5	24,7	29,9	23,92
0,84.....	31,6	26,7		
0,88.....			33,6	29,52

L'uranium et le thorium ayant des poids atomiques voisins, les courbes relatives à ces deux métaux se confondent presque et, étant données les erreurs commises par ailleurs, une courbe commune intermédiaire peut servir à déterminer à la fois les concentrations en uranium et en thorium (fig. 8).

Elle pourra même être utilisée dans le cas où le corps contient à la fois de l'uranium et du thorium.

En ce cas, on a :

$$(8,53 C_U + 1,92 C_{Th}) K' = N.$$

Si on a évalué le rapport $\frac{C_{Th}}{C_U} = m$, il vient

$$(1) \quad (8,58 + 1,92 m) C_U K' = N$$

mais le coefficient K' doit être déterminé non en fonction de la concentration en uranium seulement, mais en fonction de

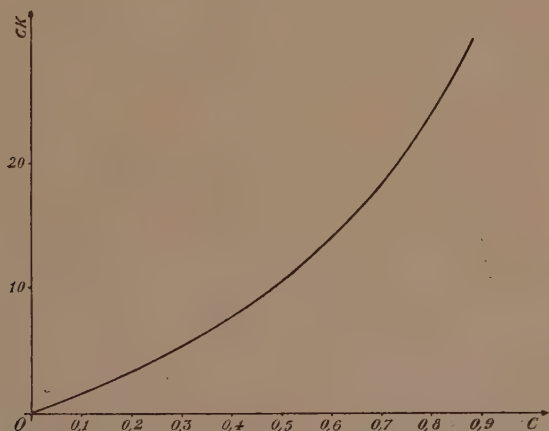


FIG. 8. — L'évaluation expérimentale du nombre N de rayons α émis par centimètre carré et par seconde ne permet pas le calcul de la concentration C en uranium ou en thorium lorsque cette concentration est supérieure à quelques unités pour cent. Il intervient en effet dans ce calcul le coefficient d'absorption K' qui varie avec la concentration. Le graphique ci-dessus représente les variations du produit CK' en fonction de C . CK' peut être évalué directement à partir de N .

la somme des concentrations en uranium et en thorium soit :

$$C_U + C_{Th} = (1 + m) C_U = C.$$

Or d'après (1)

$$C_U K' = \frac{N}{8,58 + 1,92 m}$$

d'où CK' :

$$C K' = \frac{N (1 + m)}{8,58 + 1,92 m}.$$

Cette valeur de CK' permet d'obtenir, par le graphique précédent la valeur de C . Il suffit de diviser cette valeur par $1 + m$ pour avoir C_U et on obtient aussitôt $C_{Th} = m C_U$.

Si le corps est peu radioactif, cette méthode ne peut donner que des résultats d'une précision limitée. Si la proportion d'uranium et de thorium est faible (moins de quelques centièmes par exemple) et si l'on connaît par ailleurs la composition du minéral, il sera toujours préférable de déterminer aussi exactement que possible le coefficient K' . C'est ainsi qu'un granite qui possède un coefficient K' calculé égal à 12,7 ne doit pas être confondu, comme nous le ferions en adoptant les résultats précédents, avec la silice dont le coefficient K' est de 14,1. L'erreur, en ce cas, atteint 10 %.

§ 9. — Teneur en uranium ou en thorium de quelques minerais.

Teneur en uranium d'une pechblende.

Pratiquement une pechblende ne contient que de l'uranium sans thorium ($C_{Th}/C_U \simeq 10^{-5}$). L'examen des plaques impressionnées par une pechblende donne en 1 minute une moyenne de 4,02 trajectoires par champ de microscope de 0,080 cm² d'où $N = 83,75$.

On tire de ce résultat :

$$8,58 C_U K' = 83,75 \quad \text{d'où} \quad C_U K' = 9,76.$$

Le graphique donne immédiatement

$$C_U \simeq 48 \, \%.$$

Teneur en uranium d'une carnotite.

Ce minéral ne contient que de l'uranium. L'étude des émulsions conduit à évaluer $N = 21$.

$$\text{Il vient} \quad C_U K' = \frac{21}{8,58} = 2,45$$

ce qui donne $C_U \simeq 23 \, \%$.

Teneur en thorium d'une thorite.

On trouve $N = 10,5$ donc $1,92 C_{Th} K' = 10,5$

d'où $C_{Th} K' = \frac{10,5}{1,92} = 5,46$

ce qui conduit à $C_{Th} \simeq 22 \%$.

Examen d'un sable de Itabapoana.

(État de Rio de Janeiro. Brésil.)

On trouve en 40 heures une moyenne de 225 trajectoires par champ de microscope ($0,080 \text{ mm}^2$), ce qui donne par centimètre carré et par seconde une émission de $N \simeq 1,90$ rayon.

La mesure des longueurs des trajectoires des rayons émis montre l'existence d'un grand nombre de rayons provenant du thorium C' . On compte 112 trajectoires de plus de 7 cm. d'air pour 91 comprises entre 8 et 7 cm., ce qui permet de calculer le rapport des concentrations en thorium et en uranium.

On trouve $\frac{C_{Th}}{C_U} = \frac{85,3}{\frac{\nu_2}{\nu_1} - 0,8} \simeq 275.$

On peut donc admettre que le corps examiné ne contient que du thorium. S'il renferme de l'uranium, celui-ci s'y trouve en très faible proportion.

On a donc $C_{Th} K' = \frac{1,90}{1,92} \simeq 1$

d'où, par examen du graphique :

$C_{Th} \simeq 6,5 \%$.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DE LA DISPARITION DE L'IMAGE LATENTE DANS LA PHOTOGRAPHIE DES TRAJECTOIRES DES RAYONS α

§ 10. — Méthode d'évaluation de la vitesse de disparition.

Les expériences précédentes ayant mis en évidence le fait que l'image latente des trajectoires des rayons disparaissait lorsque le développement n'avait pas lieu dans un délai de quelques jours, ce qui rendait impossible l'étude des très faibles radioactivités par la plaque photographique, nous avons voulu étudier systématiquement cette disparition et rechercher les moyens d'y remédier.

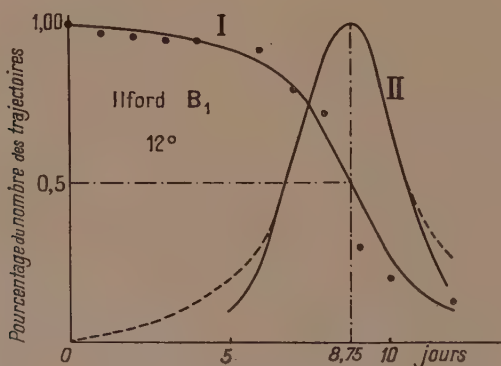


FIG. 9. — Étude du « fading » des plaques Ilford B₁.

Courbe I : pourcentage du nombre de trajectoires visibles en fonction du temps qui sépare le développement de l'exposition.

Courbe II : nombre de trajectoires d'une durée comprise entre $t - \Delta t$ et $t + \Delta t$.
 Courbe du type de Gauss avec maximum marqué pour $T = 8,75$ jours.

Ce phénomène a été remarqué la première fois par Blau et Wanbacher et il a été examiné par différents auteurs (6), Yagoda et Kaplan (7) ont étudié la variation de la densité photographique. M^{me} Faraggi et M^{lle} Albouy (8) ont mesuré la

disparition des grains. Pour nous rendre compte de la vitesse de cet effacement, nous avons évalué la diminution du nombre des trajectoires visibles en fonction du temps qui s'écoule entre l'impression et le développement.

Des plaques sensibles (Ilford C_1 et C_2) ont été exposées au rayonnement d'une matière radioactive (pechblende pulvérisée ou dépôt électrolytique de polonium). L'une d'elle est développée immédiatement, les autres, conservées dans des conditions définies, ne le sont qu'après un délai variable. Les développements se font dans des conditions identiques.

En observant les plaques avec un microscope de faible grossissement (200 à 300), on compte le nombre moyen de trajectoires visibles par champ. 100 examens, parfois 200, 300 (ou même 500) permettent d'établir, pour chaque plaque, la moyenne des trajectoires visibles inscrites sur une surface donnée.

§ 11. — Résultats.

Les résultats sont consignés dans les tableaux ci-après :

I. — Plaque Ilford B_1 :

Retard dans le développement (en jours)	Nombre moyen de trajectoires par champ de microscope	Pourcentage
r	n	
immédiat	5,62	100
1.....	5,54	98,5
2.....	3,50	98
3.....	5,50	98
4.....	3,47	97,3
6.....	5,11	91
7.....	4,42	78,7
8.....	4,05	72
9.....	4,66	30
10.....	4,11	20
12.....	0,80	14

II. — Plaques Ilford C₂ :

1° Pression normale. Humidité atmosphérique normale.
Température 17 à 18°.

(en jours)	<i>r</i>	<i>n</i>	%
0		5,33	100
4		5,00	94
7		4,68	88
10		3,45	65
11		3,30	62
12		2,56	48
13		2,30	43
14		1,87	35
15		1,11	21
17		0,49	9,2

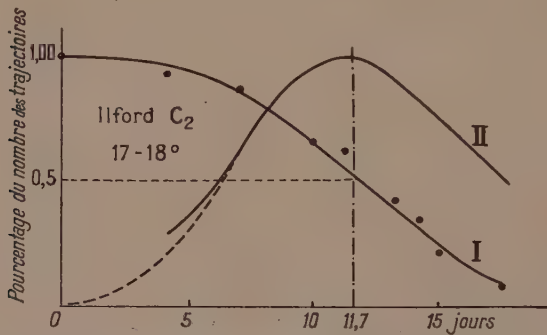


FIG. 10. — Études du « fading » des plaques Ilford C₂. Mêmes types de courbes que pour les plaques B1 (fig. 9). La durée la plus probable est de 11,7 jours.

2° Pression normale. Plaques conservées au-dessus d'une nappe d'eau. Température 14 à 15°.

(en jours)	<i>r</i>	<i>n</i>	%
0		16,00	100
1		16,02	100
2		15,56	97
3		13,41	83,6
4		10,80	67,5
5		9,75	61
6		5,10	32
7		1,93	12

3° Pression réduite. Température 14 à 15°. Atmosphère humide (trompe à eau).

(en jours)

	<i>r</i>	<i>n</i>	%
0.....		16,00	100
1.....		14,86	93
2.....		7,17	45
3.....		5,2	32,5
4.....		1,87	11,7

4° Pression normale. Température 14 à 15°. Humidité atmosphérique.

Nous avons fait 2 séries d'expériences :

série a : plaques exposées à une source de polonium,

série b : plaques exposées au rayonnement de la pechblende.

série a :

(en jours)

	<i>r</i>	<i>n</i>	%
0.....		6,24	100
1.....		6,64	106
2.....		6,08	97
3.....		6,13	98
4.....		3,70	91
5.....		6,15	98
6.....		6,00	96
7.....		5,85	93,6
9.....		5,65	90

série b :

(en jours)

	<i>r</i>	<i>n</i>	%
0.....		2,35	100
1.....		2,21	95
2.....		2,26	97,2
3.....		2,36	100
4.....		2,38	100
5.....		2,10	90
6.....		2,22	95,5

(en jours)

<i>r</i>	<i>n</i>	%
7.....	2,18	93,75
8.....	2,11	90
9.....	2,07	89
10.....	1,80	77,4
11.....	1,86	80
12.....	1,85	79

Le nombre insuffisant des plaques ne nous a pas permis des délais plus longs.

5° *Température 46 à 50° Vapeur saturante.*

(en minutes)

<i>r</i>	<i>n</i>	%
0.....	3,15	100
5.....	3,10	100
10.....	2,63	83,5
15.....	2,37	75,45
20.....	1,19	38

6° *Température 46 à 50°. Humidité atmosphérique.*

(en heures)

<i>r</i>	<i>n</i>	%
0.....	3,15	100
1.....	3,22	102,5
2.....	2,91	92,5
3.....	3,00	95
3,30.....	2,80	89
4.....	2,83	90
4,30.....	2,75	87,5
5,30.....	2,96	94
6.....	2,71	86
6,30.....	2,67	85
7.....	2,70	85,5
7,30.....	2,30	73
8.....	1,89	60
9.....	2,05	65,2
10.....	1,50	47,5

L'étude de ces résultats permet de tirer les conclusions suivantes :

1° On constate que le nombre des trajectoires visibles reste pratiquement constant pendant un certain temps variable avec la méthode de conservation, puis décroît plus rapidement pour tendre ensuite lentement vers zéro.

En portant en ordonnée le pourcentage du nombre des trajectoires visibles et en abscisse le temps qui sépare l'exposition du développement, on peut tracer les courbes I. Ces courbes donnent le pourcentage des trajectoires ayant une durée supérieure à t .

2° En partant de ces courbes I, il est possible de déterminer les courbes II qui donnent le nombre des trajectoires d'une durée comprise entre $t - \Delta t$ et $t + \Delta t$.

Ces courbes sont du *type de Gauss*. Elles présentent un maximum marqué pour un temps T qui est la durée la plus probable d'une trajectoire. Pour un temps t , l'écart par rapport à T est $(t-T)$ et les courbes précédentes sont assez bien représentées par une équation de la forme :

$$n = K e^{-\frac{(t-T)^2}{\rho}}$$

sauf pour des écarts trop grands. K et ρ sont des constantes. K représente par exemple le nombre de trajectoires qui disparaît pendant l'unité de temps au voisinage de la durée probable.

K peut se mettre sous la forme $K = \frac{k}{\rho \sqrt{\pi}}$.

Sur les figures, les courbes en pointillé représentent les courbes de probabilité qui s'écartent des courbes expérimentales.

La courbe de Gauss étant entièrement définie lorsqu'on connaît sa moyenne T et son écart quadratique moyen (qui dépend de ρ), les 2 nombres T et ρ suffisent pour construire les courbes II et I. Ils dépendent de la nature des plaques, du moyen de conservation et permettent de caractériser une expérience.

Les résultats mentionnés précédemment sont indiqués sur les graphiques et résumés dans le tableau suivant :

NATURE DES PLAQUES	MÉTHODE DE CONSERVATION	DURÉE PROBABLE T	MODULE ρ	T $\frac{1}{\rho}$	FIGURE
Ilford B ₁ ...	Pression normale, 12° humidité atmosphérique	8,75 j	2,3	3,8	1
Ilford C ₂ ...	» 47-48° » » (avril)	11,70 j	7	1,68	2
»	» 47-48° » » (juin)	43 j	8	1,62	3 A
»	» 44-45° » »	16,5 j (extrapolation)	-10	1,65	3 B 3 C
»	» 44-45° vapeur d'eau saturante	5 j	3	1,66	3 D
»	» 50° » »	48,7 mn	42	1,56	3 E
»	» 50° humidité atmosphérique	40 h	6	1,66	3 F

§ 12. — Influence de la nature de la plaque.

On voit que le « fading » est plus marqué avec les plaques B_1 qu'avec les plaques C_2 . Avec les plaques B_1 , à 12° la durée probable n'est que de 8,75 jours tandis qu'avec les plaques C_2 , malgré une température plus élevée, cette durée atteint 18,5 jours à $14-15^\circ$. Ces résultats sont en accord avec ceux d'autres auteurs. Occhialini et Powell, Yagoda (9), H. Faraggi et G. Albouy (10) signalent que le « fading » varie avec la nature des plaques employées.

Le rapport $\frac{T}{\rho}$ est constant pour un type de plaque donné.

Pour les Ilford C_2 , ce rapport $R = \frac{T}{\rho} = \frac{3}{5}$. La plaque peut donc être caractérisée par le rapport R et les conditions d'expériences par la durée probable T . Ces 2 nombres suffisent pour déterminer les courbes II donnant le nombre de trajectoires ayant une durée comprise entre $t - \Delta t$ et $t + \Delta t$ et par suite les courbes I donnant le nombre de trajectoires d'une durée supérieure à t .

Remarquons encore que le produit KT est constant (K est le nombre de trajectoires qui disparaissent pendant l'unité de temps au voisinage de la durée probable).

$K T = 100$. Or, nous avons posé $K = \frac{k}{\rho \sqrt{\pi}}$ donc pour les plaques Ilford C_2 :

$$\frac{k T}{\rho \sqrt{\pi}} = 100 \quad k = 100 \frac{\rho}{T} = 60 \sqrt{\pi}$$

d'où l'équation générale des courbes II des plaques Ilford C_2 .

$$n = \frac{60}{\rho} e^{-\frac{(t-T)^2}{\rho}}$$

Il résulte de ce qui précède qu'il devient très facile d'obtenir une courbe donnant le pourcentage des trajectoires d'une durée supérieure à t . En effet, toutes les courbes obtenues avec une même espèce de plaques peuvent se déduire les unes des

autres. Ayant tracé une courbe de durée probable T , on obtient celle de durée probable T' en multipliant les abscisses de la première par le rapport T/T' les ordonnées restant fixes. La première peut être obtenue rapidement par exemple en faisant

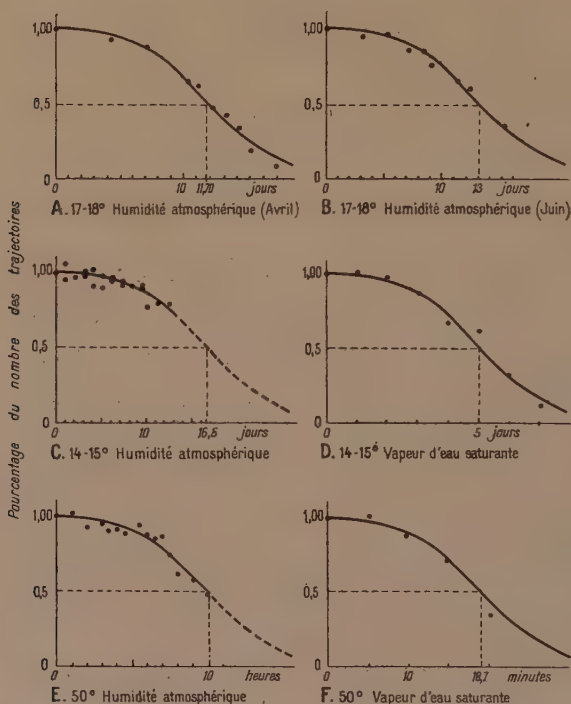


FIG. 11. — Influence des conditions de conservation sur le « fading ». Ensemble des courbes I (fig. 9) pour les plaques Ilford C_2 conservées dans des conditions différentes. On peut adopter une courbe type en modifiant convenablement l'échelle des temps.

l'étude d'une série de plaques maintenues à température élevée en atmosphère humide.

Il semble encore plus facile de construire une courbe-type et de graduer ensuite les abscisses en fonction de la durée probable.

C'est ainsi que nous avons construit les graphiques de la figure 11 relative au « fading » des plaques Ilford C_2 .

§ 13. — Influence de la température.

La durée probable diminue lorsque la température s'élève. Par exemple pour les plaques Ilford C₂, la durée probable qui est voisine de 16 jours à 14-15° tombe à 12 ou 13 jours vers 18°, pour ne pas dépasser 10 heures vers 50°. Divers auteurs avaient déjà mis ce fait en évidence, La Palme et Demers (7) signalent par exemple que l'effacement des grains est accéléré à 42° et devient négligeable à — 35°. H. Faraggi et G. Albouy (10) indiquent que la conservation des plaques en glacière ralentit le « fading », mais que celui-ci peut être accéléré et qu'on peut obtenir l'effacement en 5 heures à 47° C.

§ 14. — Influence de l'humidité.

Pertilov (1) ayant obtenu des résultats appréciables en opérant dans le vide (70 jours de pose sans fading apparent) sous la pression de 1 mm. de mercure), nous avons essayé de conserver des plaques sous pression réduite en opérant le vide avec une trompe à eau. L'effacement a été considérablement augmenté. Une contradiction si flagrante ne pouvait s'expliquer que par la présence de vapeur d'eau, ce qui nous a conduit à examiner son influence.

Celle-ci semble considérable. Elle est mise en évidence par la comparaison des courbes C et D (à 14°-15°) et des courbes E et F (à 50°).

Dans le premier cas, la durée probable qui est de l'ordre de 16,3 jours (par extrapolation) en atmosphère normale, n'est plus que de 5 jours en atmosphère avec vapeur d'eau saturante. A 50° la durée probable est réduite de 10 heures (atmosphère normale) à 18,7 minutes (en atmosphère saturée de vapeur d'eau).

Cette action de l'humidité devait être confirmée par des travaux d'autres auteurs (10).

Le climat peut donc avoir une grande influence. Les 2 courbes A et B correspondant à la même température (17-18°), mais tracées l'une en avril (A), l'autre en juin (B) montrent

une légère différence de la durée probable. Nous avons pensé que celle-ci pouvait s'expliquer par l'état hygrométrique de l'air différent suivant les saisons et K. B. Mather (12) devait par la suite vérifier notre hypothèse.

§ 15. — **Influence du borate de sodium
sur la conservation de l'image latente.**

Il a été remarqué depuis longtemps que les émulsions photographiques imprégnées de bore conservaient les images latentes beaucoup plus longtemps que les émulsions ordinaires.

Nous avons essayé de nous rendre compte de l'importance de cette action et avons, dans ce but, entrepris une série d'expériences dont les résultats sont résumés ci-après.

Méthode. — Des séries de plaques Ilford C₂ ont été plongées pendant 15 minutes dans des solutions de borate de sodium cristallisé B₄O₇Na₂, 10H₂O de concentrations diverses, puis séchées. Elles ont été ensuite exposées au rayonnement d'une source radioactive (dépôt électrolytique de polonium), puis conservées pour être développées avec des retards croissants. Une série de plaques n'a pas été immergée dans une solution de borate et sert de témoin. L'examen au microscope (grossissement 200 ou 300) permet d'évaluer le nombre de trajectoires des particules α inscrites sur chaque plaque sur une surface donnée.

Le but recherché était la détermination de la durée probable de conservation d'une trajectoire pour chaque concentration. Il n'a pu être atteint pour toutes les séries pour les 3 raisons suivantes :

a) Le nombre des plaques exposées (une quinzaine environ pour chaque concentration) s'est révélé insuffisant.

b) L'observation est parfois devenue impossible par suite de l'apparition de trajectoires parasites dont le nombre croît avec le temps et dont l'origine nous est inconnue. Il est possible qu'au moment de la pose quelques grains radioactifs aient pu se coller à l'émulsion. Leur activité serait faible, car

elle ne devient évidente qu'au bout de quelques semaines.

c) Enfin 2 séries de plaques se sont voilées progressivement. Ainsi les plaques immergées dans une solution de borate à 20 g/l, très claires jusqu'au 20^e jour, sont devenues peu à peu illisibles.

État de conservation de l'image latente après 45 jours d'attente.

Jusqu'au 45^e jour les mesures ont pu se faire correctement. Le tableau suivant donne le pourcentage du nombre des trajectoires en fonction de la concentration en borate :

Concentration										
en borate										
(en g/l)										
	0	5	10	30	40	50	60	70	80	100
Pourcent. du										
nombre des										
traj. visibles	0	91	104	101	100	105	93	84	66	10

Valeurs qui permettent de tracer le graphique de la fig. 12.

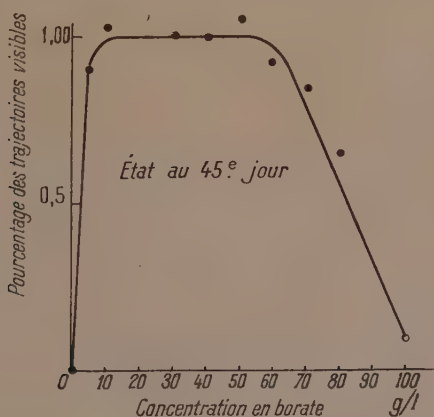


FIG. 12. — Plaques traitées au borate de sodium.

Pourcentage des trajectoires visibles ; après 45 jours de conservation, en fonction de la concentration en borate. Sur les plaques non traitées, toutes les trajectoires sont effacées. Sur celles qui ont été imprégnées d'une solution contenant de 10 à 60 g. de borate par litre, toutes les trajectoires se retrouvent.

*Limites pratiques de la conservation du nombre initial
de trajectoires.*

Les fluctuations inévitables qui accompagnent l'évaluation du nombre des trajectoires (fluctuations dues à l'émission même, à la durée du temps de pose, aux erreurs statistiques de la numération, etc.) ne semblent jamais atteindre 10 pour cent.

Nous pouvons donc admettre que lorsque nous trouvons que la plaque ne porte plus que 90 % du nombre initial des trajectoires, la période de décroissance est atteinte.

Les résultats trouvés sont indiqués dans le tableau suivant :

Concentration en borate (en g/l)	{	0	5	10	30	50	70	80	90	100
Durée de la const. du nombre des traject. (en jours)		4	45	80	60	50	25	22	16	13

Les nombres *soulignés* sont obtenus avec une précision suffisante. Les autres sont douteux et ne donnent qu'un ordre de grandeur. On peut cependant affirmer que les plaques à 10 g/l présentent, au bout de 63 jours, la totalité de leurs trajectoires initiales et que les plaques à 30 g/l ne donnent plus le 20^e jour que 50 % environ de ces trajectoires.

La figure 13 représente les variations de la durée de la constance du nombre des trajectoires en fonctions de la concentration. Malgré l'incertitude de certains points (courbe en pointillé), il est évident qu'une solution de borate de concentration de l'ordre de 10 à 30 grammes par litre donne les meilleurs résultats. Notons à ce propos que Lattes, Occhialini et Powell (9) ont signalé que la charge en bore d'une émulsion avait une importante influence sur le « fading ».

On remarque d'autre part que le borate semble jouer le rôle de renforçateur, rôle qui devait être confirmé par la suite (44). Les trajectoires obtenues avec des plaques au borate

sont plus noires et plus épaisses que celles obtenues avec les plaques ordinaires. L'observation des plaques s'en trouve grandement facilitée.

Ces expériences ont été faites en Bretagne au bord de la mer (donc avec une humidité atmosphérique assez grande) et à une température variant de 17 à 20° C.

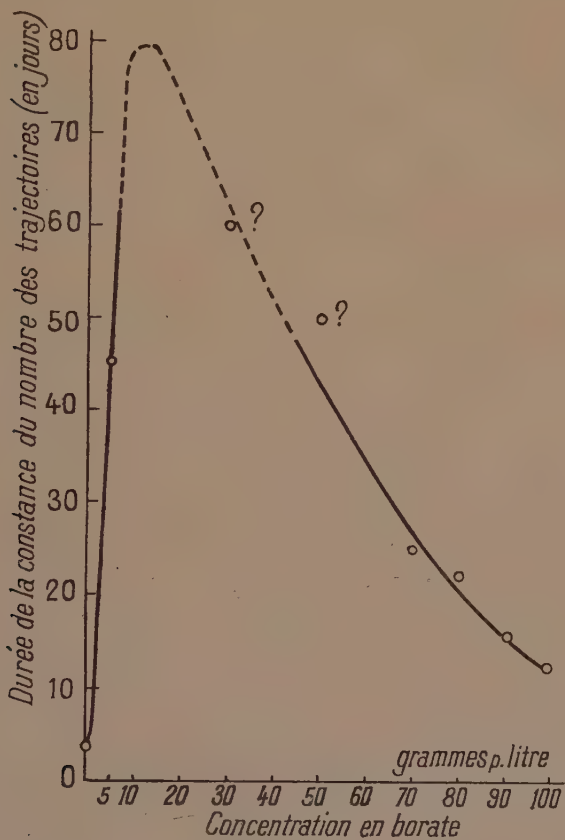


FIG. 13. — Durée approximative de la conservation des traces des trajectoires en fonction de la concentration en borate. Le maximum (ordre de 3 mois) est atteint pour une concentration d'environ 20 à 30 g/l.

§ 16. — Théorie de l'effacement.

Des recherches ultérieures faites par d'autres auteurs (13) confirment en les généralisant et en les interprétant les résultats expérimentaux exposés ci-dessus. On sait qu'une image latente est formée par la transformation d'un certain nombre d'ions Ag en atomes d'Ag (15). D'après H. Faraggi et G. Albouy l'effacement de l'image latente serait due à une oxydation par l'oxygène de l'air en présence de vapeur d'eau, l'argent déposé revenant à l'état d'ions suivant la réaction :



Cette oxydation est :

1° accélérée par la température, comme toutes les oxydations ;

2° accélérée par la présence de vapeur d'eau suivant l'équation précédente ;

3° ralentie par les corps donnant à la gélatine un pH élevé tel que le borate ($pH = 9.2$), le pH intervenant à la fois en favorisant la formation des germes et en ralentissant l'oxydation ;

4° nulle dans une atmosphère privée d'oxygène.

Notons que les nouvelles plaques Ilford C₂ (étiquettes jaunes) sont moins sensibles au fading que les précédentes. D'autre part, le fait de placer une roche polie sur une émulsion photographique comme nous le ferons souvent par la suite, prive celle-ci d'oxygène et ralentit l'effacement. Dans de telles conditions et d'après les résultats de nombreuses observations, nous avons jugé inutile de prendre des précautions spéciales lorsque la pose ne devait pas dépasser une semaine. Pour des poses plus longues nous avons toujours utilisé des plaques imprégnées de borate de sodium à 30 g/l.

ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ DES ROCHES

§ 17. — Exposé des buts recherchés.

Tous les terrains et toutes les roches contiennent des traces faibles de matières radioactives. Les premiers résultats obtenus à ce sujet sont ceux de Elster et Geitel (16), qui ont montré que divers échantillons pris dans des terrains différents produisaient dans une chambre à ionisation une augmentation de la conductibilité de l'air variable avec la nature des terrains. Les dosages ne peuvent s'effectuer par les méthodes chimiques ordinaires. Généralement on a cherché à extraire par une méthode chimique les éléments radioactifs contenus dans une quantité importante de roche examinée et à étudier ensuite le produit obtenu par une méthode radioactive. On a pu, par exemple, mesurer l'ionisation produite par les rayons α ou compter ces rayons. On a cherché également à mesurer au compteur le rayonnement (17).

Ces méthodes ne peuvent évidemment donner qu'une teneur globale. Certains auteurs ont essayé d'étudier la répartition de la radioactivité dans les roches. Piggot (18), en isolant les différents cristaux d'une roche et en les étudiant séparément, a vu que la radioactivité semblait se concentrer dans les micas. C. Goodman, Baranov et S. Kretschmer (19) ont utilisé des émulsions photographiques bien inférieures aux émulsions actuelles et montré que la radioactivité était due à des inclusions microscopiques. Enfin, rappelons que l'existence des halos pléochroïques dans certaines roches prouvaient déjà l'existence de ces cristaux.

En essayant d'appliquer la méthode de la plaque photographique indiquée dans les chapitres précédents, à l'étude de la radioactivité des roches, nous poursuivions plusieurs buts :

1° mettre en évidence la radioactivité des roches par l'obtention de photographies des rayons α issus de ces roches ;

2° déterminer le rapport C_{Th}/C_U des concentrations en thorium et en uranium et déterminer la teneur globale de ces

minéraux en matières radioactives. Comparer les résultats obtenus à ceux d'autres auteurs ;

3° nous rendre compte de la répartition de cette radioactivité, en particulier voir si les matières radioactives sont régulièrement disséminées dans la roche ou concentrées en quelques points ;

4° en ce dernier cas, examiner les inclusions radioactives des minéraux étudiés et en particulier déterminer la nature des émissions et la concentration en uranium et en thorium.

Les plaques utilisées sont des plaques Ilford C₂ d'épaisseur 50 μ . Ces émulsions sont recouvertes d'une roche polie ou d'une roche pulvérisée. Les poses ont duré de quelques heures à quelques semaines.

Les plaques C₂ conservent beaucoup mieux les images latentes que celles utilisées précédemment. Cependant comme le climat humide de la Bretagne où ces expériences ont été faites favorise le « fading », nous avons préféré, avant l'utilisation et lorsque les poses devaient atteindre ou dépasser une semaine, les imprégner d'une solution de borate de sodium à 30 grammes par litre, puis les sécher.

Les roches ont été prélevées au hasard et, pour la plupart dans le sol breton. Il s'agit donc en général de granites, de granulites, de gneiss, de micaschistes et de schistes.

Confirmant les indications de Goodman, de Baranov et Kretschmer, les premiers examens des plaques montrent que la répartition des traces des particules α est loin d'être uniforme. Au contraire, celles-ci sont groupées autour de centres actifs plus ou moins importants dont nous entreprendrons l'étude dans les prochains chapitres et qui montrent que la radioactivité des roches est due à des inclusions noyées dans une masse inactive ou peu active.

Ces résultats furent confirmés par des travaux indépendants effectués à la même époque par différents auteurs (19 bis).

CHAPITRE V

RAPPORT DES CONCENTRATIONS EN THORIUM ET EN URANIUM

§ 18. — Mesure des longueurs des trajectoires.

Le rapport des concentrations en thorium et en uranium a été évalué d'après la méthode exposée au paragraphe 3. Les plaques ont été observées avec un microscope de fort grossissement (objectif à immersion). Le rapport K_1 entre les parcours des rayons α dans l'émulsion et dans l'air est $K_1 = \frac{68.700}{38}$. 7 cm. d'air correspondent donc à 39 μ , et 5,8 cm. à 32 μ . Avec l'objectif, l'oculaire et le micromètre employés, chaque division du micromètre correspond à 1,43 μ . 39 μ et 32 μ sont donc représentés par 27 et 22 divisions. Les trajectoires les plus longues (celles du ThC' qui n'ont subi aucune absorption) mesurent 48 μ , soit 34 divisions.

Nous avons donc mesuré les trajectoires ayant une longueur supérieure à 27 divisions et celles dont les longueurs sont comprises entre 22 et 27 divisions.

Les mesures de ces longueurs sont faites à $1/2$ division près, soit 0,7 μ , ce qui correspond à 1,2 mm. d'air pour les trajectoires émises parallèlement à la surface de l'émulsion et à 1,7 mm. pour celles faisant un angle de 45° avec cette surface. Comme nous n'avons jamais mesuré de trajectoires émises avec une inclinaison supérieure à 45° nous pouvons admettre que les mesures sont faites à moins de 2 mm. près.

Nous avons pris soin de n'observer que les trajectoires émises à la surface de la plaque sensible ou légèrement au-dessus de cette surface; le sens des trajectoires se trouve facilement, car la fin du parcours est formée de grains serrés. Cela élimine les quelques traces des rayons provenant d'impuretés contenues dans la gélatine et dans le verre. Notons d'ailleurs que ces traces sont rares et qu'avec une certaine habitude elles se distinguent facilement.

Généralement, nous n'avons tenu compte que des rayons α qui sont nets d'une extrémité à l'autre, sans changement de mise au point. Il s'agit là de rayons α émis parallèlement à la surface de l'émulsion ou faisant avec celle-ci un angle très petit que la latitude de mise au point permet d'évaluer à 2° . Cependant, dans certains cas, lorsque le nombre des trajectoires n'est pas assez grand pour permettre la mesure d'une quantité suffisante de rayons remplissant les conditions précédentes, nous avons dû évaluer les longueurs des trajectoires obliques. Il nous a fallu alors faire intervenir la variation d'épaisseur de l'émulsion après développement et séchage.

D'après les indications de la maison Ilford et d'après nos propres mesures, l'épaisseur de la courbe sensible pendant l'impression est de 50μ . Après développement et séchage elle n'atteint que 24μ . Mais l'observation des trajectoires se fait à travers la gélatine et les phénomènes de réfraction semblent produire un rapprochement qu'on ne peut négliger. L'épaisseur, en effet, ne paraît mesurer que 18μ . Il en résulte qu'au moment de l'examen d'une plaque une profondeur observée de x microns correspond en réalité, avant développement, à une profondeur de :

$$\frac{50}{18} x = 2,77 x \mu.$$

En mesurant alors la projection horizontale et la projection verticale d'une trajectoire, on peut donc aisément, par application du théorème de Pythagore, obtenir la longueur réelle avant développement.

A cause de l'imprécision des mesures très obliques, nous n'avons considéré que des rayons plongeant jusqu'à un angle déterminé. Cela ne change pas le rapport $\frac{v_2}{v_1}$.

Pour éviter les calculs, simples mais longs et fastidieux, nous avons utilisé une abaque représentée par la fig. 14 et correspondant à un angle limite déterminé. Elle donne rapidement la longueur d'une trajectoire avec une précision suffisante.

Avec la limite que nous nous sommes imposée, les trajec-

toires les plus longues (48μ) s'enfoncent au maximum de 12μ dans l'émulsion développée et séchée, ce qui correspond à une profondeur de $12 \times 2,77 = 33 \mu$ dans l'émulsion pendant l'impression. L'angle limite λ est donc tel que $\sin \lambda = \frac{33}{48} = 0,68$, c'est-à-dire voisin de 45° .

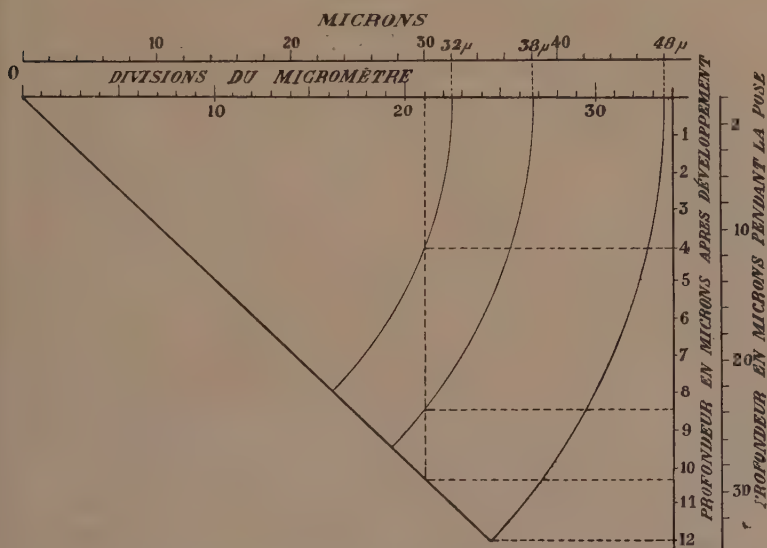


FIG. 14. — Abaque pour la détermination des longueurs des trajectoires obliques. Cette abaque tient compte de la variation d'épaisseur de l'émulsion soumise au développement et des phénomènes de réfraction. La mesure de la projection horizontale de la trajectoire et de la distance verticale apparente de ses deux extrémités permet l'évaluation de la longueur réelle avant développement.

L'axe horizontal représente la projection horizontale de la trajectoire, l'axe vertical la profondeur avant développement. L'un et l'autre sont mesurés avec une unité commune. Cependant, pour permettre une lecture directe, l'axe horizontal est ensuite gradué en divisions du micromètre, et l'axe vertical en microns mais en tenant compte de la réduction d'épaisseur après développement. Des axes de cercles concentriques de rayons d'environ 22 et 27 divisions déterminent les longueurs limites des traces.

Celles-ci sont examinées en mettant successivement au point

leurs deux extrémités, en tournant la vis micrométrique toujours dans le même sens pour éviter les erreurs dues au jeu des crémaillères. Les 2 projections horizontale et verticale obtenues permettent par simple examen du graphique de classer la trajectoire. Ainsi une trajectoire d'une longueur apparente de 21 divisions de micromètre avait, au moment de son émission, une longueur comprise entre 5,8 et 7 cm. si la distance verticale de ses 2 extrémités varie entre 4 μ . et 8,5 μ . et plus grande que 7 cm. si cette distance varie de 8,5 à 10,5 μ . Si la profondeur dépasse 10,5 μ , la trajectoire ne doit pas être retenue, car son inclinaison est plus grande que la limite fixée.

Il est évident que cette limite est arbitraire. L'angle λ variera d'une mesure à l'autre et généralement en sens inverse du nombre de trajectoires observées. Si elles sont très nombreuses, et émises parallèlement à la surface de l'inclusion, on pourra se contenter d'un angle λ pratiquement nul. Au contraire, si leur nombre est restreint, ou si presque tous les rayons α sont plongeants, on devra augmenter l'angle λ . Nous ne conseillons cependant pas de dépasser 45° en raison de l'incertitude des mesures; quelle que soit l'inclinaison limite l'abaque précédente peut être utilisée, il suffit de déterminer à l'avance l'angle maximum adopté.

§ 19. — Résultats.

Les résultats que nous avons obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Nature et origine de la roche	C _{Tb} /C _U
Micaschiste. Quiberon (Morbihan).....	5,4
Micaschistes. Arradon (Morbihan).....	2,5
Gneiss granulitique. Le Rennaveau-en-Vannes (Morbihan).....	2,75
Gneiss. Kerhino-en-Vannes.....	1,7
Granite. Bretagne (Collect. de M. A. Demay).....	2,8
Granite. Quiberon.....	2,75
Granulite. Ile-aux-Moines (Morbihan).....	3,6

Dans l'ensemble, ces résultats confirment ceux obtenus antérieurement par d'autres auteurs utilisant des méthodes complètement différentes. Les valeurs proposés par ceux-ci sont résumées ci-après (20) :

Auteurs	Année	Roches acides (rapport C_{Th}/C_U)
Jeffreys.....	1936	2,6
Holmes.....	1938	1,7
Keevil.....	1938	2,8
Holmes.....	1938	2,5
Nier.....	1938	3,3
Evans, Goodman.....	1941	4,5
Evans, Goodman, Keevil.....	1942	4

Les derniers travaux de N. B. Keevil (21) tendent à donner à ce rapport la valeur 3,35 pour les roches granitiques (moyenne de 19 déterminations). Les résultats qu'il obtient varient d'ailleurs extrêmement avec la nature de la roche et les différents granites étudiés ont des rapports C_{Th}/C_U variant de 0,7 à 8. Nos mesures cadrent donc bien avec celles de cet auteur et nous adopterons par la suite la valeur $C_{Th}/C_U = 3$ généralement admise.

Nous devons cependant signaler que quelques roches (micaschiste de Quiberon, et granulite de l'Ile-aux-Moines semblent avoir une teneur en thorium légèrement plus élevée. Ceci pourrait être dû à la présence de cristaux radioactifs assez grands (ordre du mm.), ne contenant que du thorium, et qui modifieraient le rapport des concentrations de l'ensemble. Nous avons rencontré, pour la première fois de telles inclusions dans des granites polis, mais nous les avons reconnus sans doute possible dans les deux roches citées.

CHAPITRE VI

TENEUR GLOBALE EN URANIUM ET EN THORIUM DE QUELQUES ROCHES

§ 20. — Principe de la méthode.

En admettant le rapport $C_{Th}/C_U = 3$ évalué dans le précédent chapitre, il nous est possible de déterminer les teneurs en uranium et en thorium de quelques roches.

Le nombre N de rayons α émis par cm^2 et par seconde est tel que :

$$N = (8,58 C_U + 1,92 C_{Th}) K'.$$

Si l'on pose

$$C_{Th} = 3 C_U,$$

il vient $N = 14,34 C_U K'.$

La détermination du coefficient K' est délicate. Pour le granite en effet $K' = 12,7$, pour la silice $K' = 14,1$, pour le mica $K' = 16,3$ et pour les zircons $K' = 19$. Comme il s'agit de faibles concentrations et généralement de roches pulvérisées, donc de cristaux radioactifs de dimensions très réduites, nous avons adopté une valeur moyenne $K = 16$. Ceci introduit peut-être une erreur qui est au maximum de $3/13 \approx 22\%$, mais qu'il semble difficile d'éviter.

Nous trouvons donc :

$$C_U = \frac{N}{14,34 \cdot 16} = \frac{N}{230} = 0,0043 N.$$

§ 21. — Détermination du nombre moyen N de trajectoires visibles émises par cm^2 et par seconde.

Pour déterminer le nombre N , il faut, nous l'avons vu, évaluer la moyenne du nombre de trajectoires visibles inscrites par champ de microscope pendant un temps de pose donné, et ramener ce résultat à $1 cm^2$ et à 1 seconde.

Cette numération est évidemment soumise aux lois de la statistique. Pour les minerais fortement radioactifs, étudiés précédemment, l'activité était à peu près uniforme et l'on trouvait, dans chaque champ de microscope, à peu près le même nombre de trajectoires. Une centaine de champs, pris au hasard, semblaient suffire pour établir une bonne moyenne. Si n représente le nombre de champs examinés, les calculs de Poisson font admettre une erreur absolue probable de $0,67 \sqrt{n}$. 100 champs conduisent donc à une erreur relative de 6,7 %.

Pour les roches, cette détermination présente une certaine difficulté en raison de la répartition non uniforme de la radioactivité. Le nombre de champs à examiner dépendra de cette répartition et devra être d'autant plus grand que la répartition sera moins régulière. Il semble difficile d'indiquer le nombre de champs sur lequel on doit établir la moyenne. Le mieux, semble-t-il, est de calculer celle-ci à chaque fois qu'on a compté les trajectoires de 20 ou 30 champs. On s'arrête lorsque cette moyenne tend vers une valeur constante. Les concentrations de rayons rencontrées font brusquement changer la moyenne. En général, pour le même temps, avec une roche pulvérisée, les agglomérations montrent au maximum 100 trajectoires, alors qu'avec la même roche polie, elles peuvent en contenir jusqu'à 2.000 ou 3.000. Si l'on compte n champs, la brusque découverte d'une concentration augmente la moyenne de $100/n$ s'il s'agit d'une poudre et de $2.000/n$ s'il s'agit d'un roche compacte. En tolérant une erreur absolue de 0,2 trajectoire sur la moyenne, l'observation de 500 champs suffit pour une poudre. Il en faut théoriquement 10.000 pour certaines roches polies.

Les 2 graphiques (fig. 15) montrent clairement comment nous avons pu établir nos moyennes. Ils correspondent tous deux à la même roche, un granite de Bretagne de la collection de M. A. Demay, mais le premier échantillon a été pulvérisé et le second poli. On a donc très souvent intérêt, pour la détermination globale de la radioactivité à impressionner la plaque avec la roche en poudre plutôt qu'avec la roche

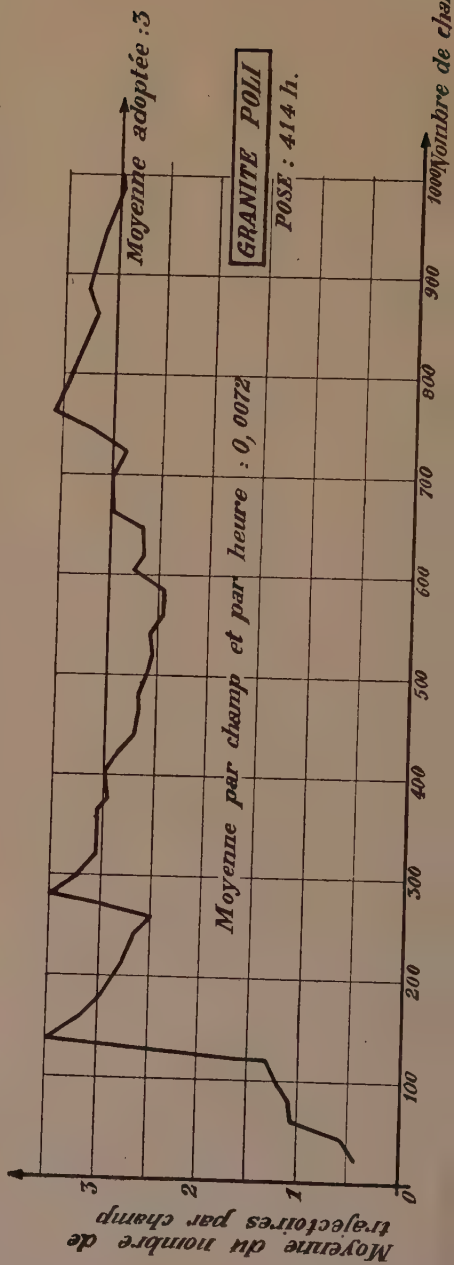
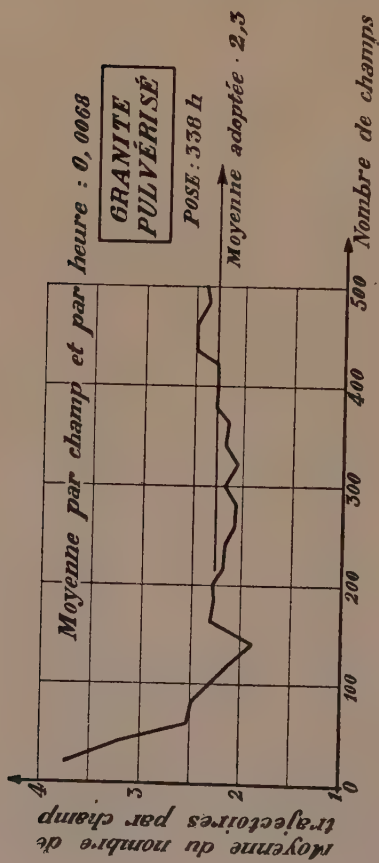


FIG. 15. — Établissement de la moyenne du nombre de trajectoires visibles par champ de microscope. On calcule la moyenne totale à chaque fois qu'on a compté le nombre des trajectoires inscrites dans 20 champs.

A. Granite pulvérisé. Les grains radioactifs étant broyés, la radioactivité de la poudre est presque uniforme. On arrive assez rapidement à une moyenne constante (500 champs).

B. Le même granite poli. Les grains radioactifs sont plus gros et la répartition est loin d'être uniforme. La découverte des traces produites par une inclusion modifie brusquement la moyenne. Il faut examiner au moins 1.000 champs pour tendre vers une constante.

polie. Les gros grains radioactifs sont broyés et se mélangent à peu près régulièrement à la matière inerte.

Ceci n'est d'ailleurs pas général, car certaines roches polies ne présentent pas les fortes concentrations dont nous parlions précédemment, mais elles montrent au contraire un grand nombre de petites concentrations. En ce cas, la détermination du nombre N peut aisément se faire avec la roche polie.

Notons que, contrairement à ce qu'on pourrait penser, la réduction d'un corps en poudre ne modifie pas le nombre de rayons émis par cm^2 et par seconde. Plusieurs expériences ont montré qu'une roche pulvérisée doublait pratiquement de volume : 1 cm^3 de granite compact donne 2 cm^3 de granite pulvérisé. Le cm^3 supplémentaire est de l'air interstitiel d'un poids d'environ $0,0013 \text{ g.}$, poids négligeable par rapport à celui des autres constituants. La concentration en poids de la matière reste pratiquement invariable et le coefficient K' ne change pas. La teneur en poids des matières radioactives n'a pas varié non plus, donc le nombre N reste constant.

Nous avons vérifié ce fait expérimentalement. Le granite de Bretagne, dont il était question plus haut, nous donne par heure et par champ de microscope $0,0068$ trajectoire avec la roche pulvérisée et $0,0072$ trajectoire avec la roche polie. La différence de $5,7 \%$ semble être inférieure aux erreurs de statistique.

Il faut se méfier toutefois des pertes d'émanations et il y a peut-être intérêt à ne pas pulvériser trop finement. D'autre part, il ne faut pas exagérer le temps de pose, car on risque d'obtenir des concentrations très denses où toute numération est impossible. Souvent même un premier essai fait avec une pose de un jour ou deux sera nécessaire pour donner une idée des dimensions, du nombre et de l'activité des inclusions. Sauf en cas de roches à radioactivité particulièrement faible, une pose de 3, 4 ou 5 jours suffira pour obtenir de bons résultats.

§ 22. — Résultats.

Nous donnons ci-après ceux que nous avons obtenus :

Nature et origine de la roche	$N \times 10^3$	$C_U \times 10^5$	$C_{Th} \times 10^5$
Granite porphyroïde (Les Trois Rois, Vannes, Morbihan)...	2,6	1,44	3,3
Granite (Aber-Ildut).....	1,25	0,54	1,62
Granite de Bretagne (Coll. M. Demay).....	2,0	0,86	2,58
Granite (Le Garo, près Vannes).	1,0	0,43	1,29
Granite (Lignole, près Vannes).	8,0	3,44	10,32
Granite (Le Guern, près Vannes).	3,4	1,46	4,38
Granite (Vallée de l'Ellée, le Faouet, Morbihan).....	1,2	0,51	1,53
Granite (Saint-Guérolé-Pen marc'h, Finistère).....	1,0	0,43	1,29
Granite rose (Roscanvel, Finis- tère.....	2,16	0,92	2,76
Gneiss (Kerhino-en-Vannes) ..	1,0	0,43	1,29
Gneiss granulitique (Ile d'Ilur, Golfe du Morbihan).....	0,8	0,34	1,0
Gneiss (Bernus-en-Vannes)...	0,9	0,38	1,17
Granulite (Isle-aux-Moines, Golfe du Morbihan).....	0,8	0,34	1,0
Granulite (Ty Gward, La Tri- nité-sur-Mer, Morbihan)....	1,1	0,47	1,41
Granulite (Larmor-Baden, Mor- bihan, côte Ouest).....	0,5	0,22	0,66
Granulite (Larmor-Baden, Mor- bihan, côte Sud).....	1,25	0,54	1,62
Granulite (Ile de Gavr'Inis, Golfe du Morbihan).....	1,3	0,56	1,68
Micaschiste (Quiberon, Mor- bihan).....	2,0	0,86	2,58
Micaschiste (Arradon, Mor- bihan).....	1,9	0,81	2,43

Nature et origine de la roche.....	N $\times 10^3$	C _U $\times 10^5$	C _{Th} $\times 10^5$
Micaschiste (Audierne, Finistère).....	0,28	0,12	0,36
Sérito-schiste (Saint-Nolff, Morbihan)	0,85	0,36	1,08
Schiste glanduleux (Tréalré, Morbihan).....	3,0	1,29	3,9
Schiste à amphibole (Cosquéric en-Vannes).....	2,6	1,12	3,36
Schiste (Larré, Morbihan)....	1,36	0,58	1,74
Sable (Plage de Kerhino. La Trinité-sur-Mer, Morbihan).	0,06	0,024	0,07
Sable (Plage des « Américains », La Trinité-sur-Mer).			
1 ^{er} échantillon.....	14	6,0	18,0
2 ^e échantillon.....	6,0	2,58	7,8
Sable (Plage des Demoiselles, Pénestin, Morbihan).....	12	5,16	15,5

Ces résultats nous montrent que les roches étudiées ont, en général, des teneurs globales en uranium légèrement inférieures à 10^{-5} (moyennes pour 25 mesures : $0,75 \cdot 10^{-5}$) et en thorium de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-5}$. Ils correspondent très exactement à ceux cités par M^{me} Curie (22), qui donne pour les granites et les gneiss une teneur moyenne en uranium de l'ordre de $0,8 \cdot 10^{-5}$ et une teneur moyenne en thorium atteignant $2 \cdot 10^{-5}$ et pour les grès et les schistes des concentrations de $C_U = 0,4 \cdot 10^{-5}$ et $C_{Th} = 1,2 \cdot 10^{-5}$.

Ils confirment également ceux d'Evans (23) qui admet pour les granites des concentrations en uranium variant de $0,3 \cdot 10^{-5}$ à $2,53 \cdot 10^{-5}$ et des concentrations en thorium allant de $0,6 \cdot 10^{-5}$ à $4,1 \cdot 10^{-5}$, mais ils semblent légèrement supérieurs, dans l'ensemble à ceux que donne N. B. Keevil (24) dont les moyennes s'établissent aux environs de $C_U = 0,4 \cdot 10^{-5}$ et de $C_{Th} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ pour une dizaine de granites.

Il est vrai que nous devons noter quelques roches, assez rares, qui ont des teneurs nettement inférieures à notre

moyenne, telles que la granulite de Larmor-Baden, côte ouest ($C_U = 0,2 \cdot 10^{-5}$) et le micaschiste d'Audierne ($C_U = 0,11 \cdot 10^{-5}$). Trois autres roches non mentionnées dans le tableau précédent ne semblent contenir que des traces de matières radioactives (granulite de La Chesnaye-en-Vannes, quartz de Ty Gward à La Trinité-sur-Mer, granite de Loctudy (Finistère)). Pour ces dernières les traces des rayons α sont rares et généralement isolées. Leur teneur en uranium ne semble pas supérieure à 10^{-7} , mais peut-être ne s'agit-il que d'échantillons particulièrement pauvres dont la composition ne correspond pas à celle de l'ensemble de la roche. Remarquons en effet que deux échantillons, prélevés dans le même filon rocheux, à 500 mètres l'un de l'autre ont donné des résultats nettement différents. Ce sont les deux échantillons de granulite de Larmor-Baden, dont l'un pris sur la côte ouest, accuse une concentration en uranium de $0,2 \cdot 10^{-5}$ alors que l'autre, pris sur la côte sud, a une concentration qui atteint $0,5 \cdot 10^{-5}$.

À côté de ces roches à teneurs inférieures à la moyenne, nous devons signaler quelques échantillons plus actifs. Parmi ceux-ci, le granite de Lignole, près Vannes, montre une concentration en uranium de $3,2 \cdot 10^{-5}$ et en thorium de $10,32 \cdot 10^{-5}$. Cette roche n'est pas un granite franc, car elle a été prélevée à la séparation de deux massifs rocheux, l'un de granite, l'autre de gneiss qui coupent le Morbihan du sud-ouest au nord-ouest. Keevil a remarqué un fait semblable et signale (25) un massif dont la radioactivité est plus forte sur les bords.

Nous mentionnerons également spécialement le sable de Pénestin (Plage des Demoiselles) et celui de La Trinité-sur-Mer (Plage des « Américains »), dont les concentrations en matières radioactives dépassent nettement celles des roches qui leur ont donné naissance. Le sable de Pénestin est connu depuis les temps préhistoriques pour sa teneur en étain qui fit donner le nom au village voisin. Au siècle dernier on devait y découvrir de l'or et constater qu'il était presque uniquement formé d'éléments lourds (cassitérite, magnétite, etc...) (26). Il a été déposé par les eaux de la Vilaine qui

l'ont arraché aux roches désagrégées des terrains traversés. Il s'est produit une lévigation naturelle avec accumulation, en certains endroits, des éléments lourds. Il était donc naturel d'y trouver les inclusions radioactives contenues dans les roches.

Le fait ne semble pas particulier aux rivages de la Vilaine et la richesse en éléments radioactifs du sable de la plage des « Américains », à La Trinité-sur-Mer, richesse relative par rapport à celle des plages voisines pourrait s'expliquer par un phénomène du même genre.

CHAPITRE VII

ÉTUDE DES DIVERSES INCLUSIONS RENCONTRÉES DANS LES ROCHES ÉTUDIÉES

§ 23. — Généralités.

Nous avons signalé (§ 17) que la radioactivité des roches n'est pas répartie uniformément. Elle est au contraire concentrée dans de petites inclusions qui donnent en certain points de la plaque des amas de trajectoires de rayons α .

L'étude de ces agglomérations de trajectoires montre que ces inclusions ne sont pas toutes semblables. Certaines, émettant un grand nombre de particules α , ont une forte teneur en matières radio-actives ; d'autres, ne donnant qu'un nombre restreint de rayons α , ont une teneur bien moindre. Nous avons essayé, dans ce qui suit, de classer les inclusions d'après leurs concentrations en uranium et en thorium.

Nous avons quelquefois impressionné les plaques avec des poudres (concentrés d'éléments lourds des roches, sables naturels), mais, le plus souvent, nous l'avons fait avec des roches polies. Cette dernière méthode présente l'avantage de permettre le repérage de l'inclusion et d'obtenir d'elle plusieurs impressions. Elle autorise, par la suite, l'identification minéralogique.

A chaque pose faite avec une roche polie, nous avons placé

notre échantillon sur l'émulsion et avons éclairé l'ensemble par-dessus pendant un temps très court de l'ordre de 2 ou 3 secondes. La plaque se trouve ainsi impressionnée par la lumière sur les parties non recouvertes et le développement dessine, en noir, dans tous ses détails, le contour de la roche. On peut ainsi repérer avec soin la position des agglomérations des rayons sur la plaque et déterminer à 10 ou 15 μ près leur origine sur le minéral.

A. — PETITES INCLUSIONS A TRÈS FORTE RADIOACTIVITÉ.

§ 24. — Origine.

Nous devons signaler tout d'abord, la présence, dans les roches d'un petit nombre d'inclusions ayant une surface de l'ordre de quelques centièmes de millimètres carrés et possédant une très forte radioactivité.

Nous les avons rencontrées :

1° Dans un échantillon poli d'un granite de Bretagne (Collection de M. A. Demay), granite dont nous avons déjà étudié la teneur globale (fig. 19).

2° Dans un concentré d'éléments lourds extraits par M. Demay de ce même granite de Bretagne (fig. 18).

3° Dans un échantillon de granite poli de la région d'Angers. (fig. 17-20-21).

4° Dans le sable de Penestin déjà signalé.

Un premier examen des longueurs des trajectoires montrent que certaines impressions possèdent un grand nombre de trajectoires correspondant à plus de 7 cm. d'air et que d'autres, au contraire, n'en possèdent pas ou très peu. Ceci nous permet donc de classer immédiatement ces inclusions en 2 catégories : celles qui ont une forte teneur en uranium et celles qui ont une forte teneur en thorium.

§ 25. — Inclusions à forte teneur en thorium.

Le calcul du rapport des concentrations en thorium et en uranium par la méthode exposée précédemment (§ 17) nous a donné les résultats résumés dans le tableau suivant :

Origine	N° des inclusions	Surface approximative	v_1	v_2	$\frac{C_{Th}}{C_U}$
Sable de	1	0,16	84	45	∞
Pénestin	2	0,04	26	21	364
(Plage des	3	0,04	16	11	∞
Demoiselles)	4	0,02	19	15	∞
Éléments	1	0,03	32	30	24
lourds du	2	0,02	24	20	110
Granite de	3	0,005	12	12	16
Bretagne	4	0,04	17	12	∞
(Coll. de	5	0,03	35	24	∞
M. A. Demay)	6	0,02	22	18	194
Granite d'Angers	c	0,015	8	8	16

Ces résultats tendent à prouver que ces inclusions contiennent une très forte proportion de thorium avec peu ou pas d'uranium. Par la suite, nous avons déterminé la concen-



FIG. 16. — Concentré d'éléments lourds du granite de Bretagne. Pose relativement courte (200 minutes).

178 trajectoires provenant d'un champ d'environ 0,025 mm².

Quelques trajectoires de Th C'. Ce qui laisse supposer qu'il s'agit d'une inclusion à thorium. Le calcul de la concentration donne : $C_{Th} \approx 80\%$.

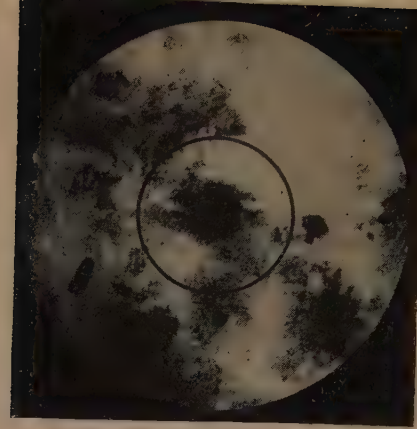
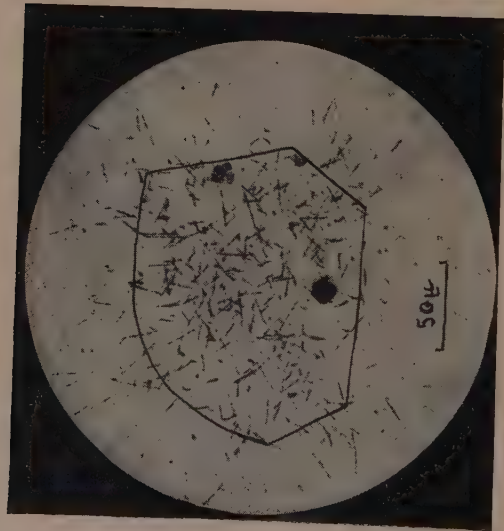


Fig. 17. — *Inclusion à forte teneur en thorium*. Granite poli de la région d'Angers, inclusion c. La surface de l'inclusion a pu être déterminée approximativement par l'examen d'une plaque obtenue avec une pose relativement longue (16 heures). La numération des particules émises n'a pu se faire que par l'étude d'une plaque obtenue avec un temps de pose plus court (4 heures). Une pose de 66 heures n'a pas permis de préciser davantage le contour de l'inclusion, car au moment de la pose, le cristal s'est trouvé séparé de l'émulsion par une mince couche d'air. Elle a permis par contre la mesure des longueurs des trajectoires et l'évaluation du rapport des concentrations en thorium et en uranium. A droite, le cristal radioactif.

tration en matières radioactives de ces inclusions en les admettant formées uniquement de thorium.

Pour le sable de Pénestin et pour le concentré d'éléments lourds du granite de Bretagne, le calcul de cette teneur n'a pu se faire avec les plaques précédentes qui ont été obtenues avec des poses de plusieurs jours. En effet, le centre des traces



FIG. 18. — Trajectoires données en 3 jours par une inclusion à forte teneur en thorium rencontrée dans un concentré d'éléments lourds du granite de Bretagne (Coll. de M. Demay).

des inclusions montrent un fouillis inextricable de trajectoires (plusieurs milliers par champ de microscope) et toute numération est impossible.

Une pose relativement courte de 3 heures 20 minutes (soit 200 minutes) nous a permis de trouver une trace donnant 178 trajectoires dans un champ d'environ $0,025 \text{ mm}^2$ (fig. 16). Nous avons pu ainsi déterminer la concentration en thorium dans de bonnes conditions. Cette teneur évaluée à 10 ou 15 % près est de l'ordre de 80 %.

Pour le granite d'Angers, la mesure s'est trouvée facilitée par le fait que le grain radioactif est inclus dans la roche. Malgré de multiples nettoyages avec des solvants divers (alcool, acétone, benzine, éther...), chaque pose de la roche a donné, à la même place, une concentration de rayons α . C'est ainsi que nous avons pu faire une pose relativement longue pour déterminer la surface dans de bonnes conditions car, dans ce cas, les trajectoires en grand nombre dessinent le contour approximatif du cristal et une pose courte pour faire une numération convenable des rayons émis. Nous avons obtenu les résultats suivants : (fig. 17). Pose 16 heures : Surface approximative $15.000 \mu^2$ Pose 4 heures : 72 trajectoires d'où $N = 33,6$

$$\text{donc } 1,92 C_{Th} K' = 33,6 \quad C_{Th} K' = 17,4.$$

Le graphique du paragraphe 8 donne $C_{Th} = 68 \%$.

Cette teneur, du même ordre de grandeur que la précédente, correspond, aux erreurs près, à celle de la thorite SiO_2, ThO_2 qui contient 71 % d'uranium.

§ 26. — Inclusions à forte teneur en uranium.

En étudiant le granite poli de la région d'Angers, nous avons découvert, à côté de l'inclusion à thorium (désignée précédemment par c), des inclusions émettant un nombre bien plus grand de rayons α et contenant sans aucun doute de l'uranium.

Nous avons pu obtenir des photographies avec des poses de 30 minutes, 95 minutes, 2 heures 30 minutes, 4 heures, 19 heures 44 minutes, 20 heures et 66 heures. L'évaluation du nombre de rayons α visibles émis par centimètre carré et par seconde a été effectuée sur ces divers clichés et nous avons trouvé les résultats suivants : (fig. 20).

Inclu- sion	Temps de pose	de	Nombre de trajectoires visibles	Nombre moyen de trajectoires par minute	Surface de l'inclusion	N
a	30 mn.		16	0,53	4.500 μ^2	192
	95 mn.		45	0,47		
	2 h. 30 mn.		78	0,52		
	4 h.		132	0,55		
b	19 h. 44 mn.				4.100 μ^2	211
	3 h.		96	0,53		

La mesure des longueur des trajectoires montre nettement l'existence de quelques rayons ayant dans l'air un parcours de plus de 7 cm. Ceci implique nécessairement la présence de *thorium*. Il ne peut cependant être question de considérer que

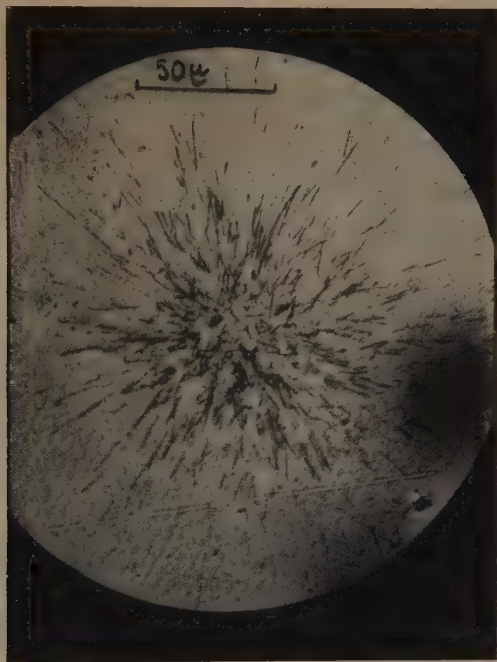


FIG. 19. — Inclusion à forte teneur en uranium rencontrée dans un granite de Bretagne poli (Coll. de M. H. Demay).

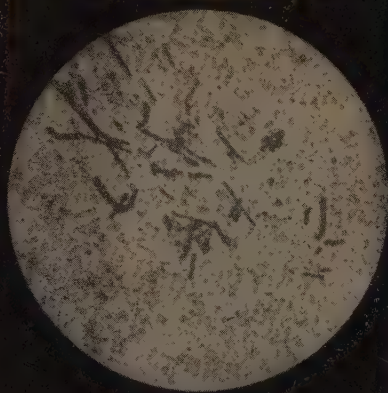
L'inclusion a été séparée de la plaque photographique par une mince couche d'air ou de matière inactive. Il est difficile de déterminer le contour de l'inclusion (nous l'avons estimé, en prolongeant les trajectoires à 4, 9, 10—5 cm²).

La mesure des longueurs des trajectoires ne permet pas de déceler une seule trajectoire de plus de 7 cm. d'air, c'est-à-dire provenant certainement du Th C'. Nous avons donc admis que cette inclusion contenait de l'uranium et peu ou pas de thorium.

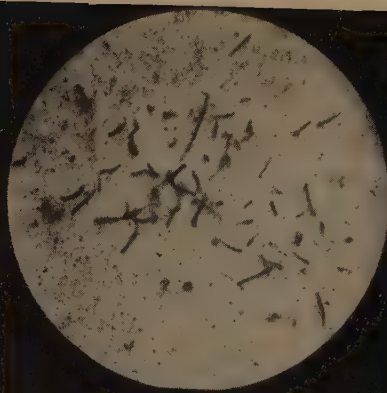
cette inclusion ne contient que du thorium comme celles que nous avons étudiées précédemment pour deux raisons : le nombre des trajectoires de plus de 7 cm. d'air sont en nombre extrêmement réduit (2 ou 3 sur environ 600) et le thorium en



30 mn



95 mn



2 h 30 mn

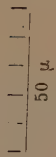
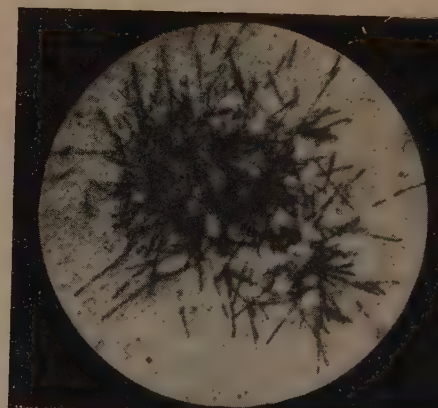
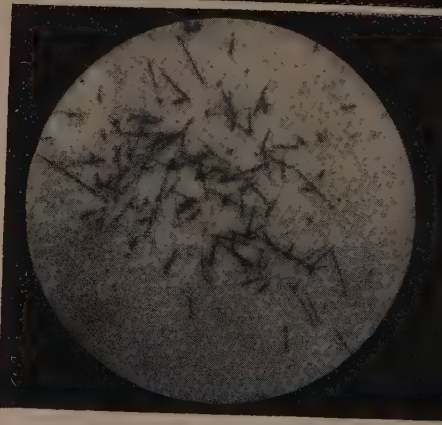


Fig. 20.—*Inclusion à forte teneur en uranium. Granite d'Angers poli, inclusion a. Traces obtenues avec des temps de pose différents. La pose de 20 heures permet de déterminer convenablement le contour de l'inclusion, les autres ne permettent que d'obtenir le nombre de rayons émis.*



équilibre avec ses dérivés ne peut donner au maximum que 80 trajectoires visibles par centimètre carré et par seconde. Nous sommes donc conduits à admettre *la présence d'uranium*.

L'évaluation du rapport C_{Th}/C_U des concentrations en thorium et en uranium ne peut donner que des résultats très approximatifs, car le nombre des trajectoires facilement mesurables est réduit, les grains radioactifs étant sans doute légèrement distants de l'émulsion. En considérant un certain nombre de trajectoires plongeantes et en corrigeant leur longueur apparente nous avons trouvé pour l'inclusion *a*, en examinant 7 photographies, 5 rayons ayant dans l'air un parcours de plus de 7 cm. et 38 rayons ayant un parcours compris entre 5,8 et 7 cm. Les résultats obtenus avec l'inclusion *b* sont du même ordre. Ces nombres sont insuffisants pour une détermination satisfaisante.

Il est vraisemblable d'admettre que l'uranium et le thorium n'existent pas dans cette roche à l'état pur mais sous forme d'oxyde. Or l'oxyde d'urane et l'oxyde de thorium contiennent environ 85 % de métal, ce qui nous conduit à écrire que la somme des concentrations en uranium et en thorium est au plus égale à 0,85 :

$$C_U + C_{Th} \leq 0,85.$$

D'autre part, on doit avoir :

$$(8,58 C_U + 1,92 C_{Th}) K' = N.$$

Le minerai ayant une très forte concentration en métaux radioactifs, nous avons $K' = 32$ (voir § 8).

Si on pose $C_{Th} = 0,85 - C_U$
il vient : $213 C_U = N - 52$

ce qui donne :

pour l'inclusion *a* : $C_U = 66 \%$, , $C_{Th} = 19 \%$
pour l'inclusion *b* : $C_U = 73 \%$, , $C_{Th} = 10 \%$.

Ces valeurs des concentrations en uranium représentent des minima, car une concentration plus faible en uranium impo-



FIG. 21. — *Inclusion à forte teneur en uranium. Granite d'Angers, inclusion b (voir planche précédente).*

- A. — Le cristal radioactif photographié à la même échelle que les traces laissées par lui sur l'émulsion.
- B. — Les traces laissées par le cristal sur l'émulsion (en 19 heures 44 minutes).
- C. — La superposition des 2 photographies précédentes. On constate la parfaite correspondance des contours du cristal et des traces.

serait pour avoir $N = 192$ ou $N = 211$ une concentration très grande en thorium et la somme $C_U + C_{Th}$ dépasserait 0,85, ce qui est peu probable.

Mais il est bien évident qu'il peut y avoir une teneur en uranium supérieure à 66 % pour *a* et à 73 % pour *b* jusqu'aux limites données par les équations

$$8,58 C_U \times 32 = N$$

établies pour les corps ne contenant que de l'uranium. Ces limites sont environ de 70 % pour l'inclusion *a* et de 77 % pour l'inclusion *b*.

A cause des erreurs commises en particulier sur l'évaluation de la surface, ces valeurs ne sont connues qu'avec une précision de l'ordre de 10 %. Il semble donc logique d'admettre une moyenne entre les résultats donnés par les 2 inclusions et de considérer qu'elles contiennent environ 70 % d'uranium et quelques centièmes de thorium.

§ 27. — Aspect des inclusions sur la roche.

Nous avons essayé de reconnaître sur la roche les inclusions mentionnées aux paragraphes 25 et 26. Nous avons opéré de la façon suivante. Nous avons placé sur la platine du microscope la roche et la plaque convenablement superposées (ce qui est possible grâce au dessin du contour de la roche sur la plaque). En déplaçant l'ensemble roche-plaque, nous avons amené sur l'objectif les traces données par l'inclusion recherchée sur la plaque. Celle-ci enlevée, l'inclusion doit se trouver exactement sous les traces. A cause des erreurs de repérage, erreur atteignant 10 ou 15 μ , elle ne s'y trouve pas généralement, mais reste dans le champ du microscope. Nous avons alors recherché parmi les inclusions visibles, celle qui correspondait en forme, en grandeur et en orientation à la trace inscrite sur la plaque. A titre de vérification nous avons entouré l'inclusion repérée de feuilles d'aluminium de 30 μ d'épaisseur qui arrêtent une grande partie des rayons α , et avons essayé d'impressionner une plaque photographique avec la roche ainsi

préparée. Nous avons obtenu, à l'endroit laissé libre un grand nombre de trajectoires, ce qui prouve que l'inclusion était bien découverte.

Dans les deux cas (inclusion à thorium et inclusion à uranium), le cristal a la forme d'un petit grain brun foncé à angles arrondis (fig. 17 et 21).

Les surfaces et les formes de ces grains correspondent très exactement à celles que nous leur avons données après examen des traces des trajectoires des particules α .

B. — INCLUSIONS A FAIBLE TENEUR EN URANIUM.

§ 28. — Origine, dimensions, et teneurs des inclusions à faible concentration en uranium.

A côté des inclusions précédentes très radioactives, nous avons rencontré, dans des roches polies, certains cristaux dont l'activité est bien moindre.

Leurs dimensions sont assez réduites : elles varient de quelques centaines à quelques milliers de microns carrés.

Aucune de ces inclusions n'a présenté de rayons ayant dans l'air un parcours supérieur à 7 cm. d'air, bien que nous ayons examiné dans les agglomérations signalées ci-après plus de 400 trajectoires. Nous admettrons donc qu'elles ne contiennent que de l'uranium.

Certaines d'entre elles se sont trouvées au contact de l'émulsion et l'évaluation de la surface d'émission n'a pas présenté de grosses difficultés. D'autres inclusions ont été au moment de la pose séparées de la plaque photographique par une mince couche de matière inerte. En ce cas, cependant, nous avons pu en déterminer les dimensions approximatives en prolongeant les trajectoires les plus voisines de la source. On peut difficilement tenir compte des trajectoires les plus éloignées en raison de la distorsion dans l'air. L'appréciation de la surface introduit donc ici une erreur assez grande. En ne mesurant que la projection du cristal, on commet certainement une erreur par défaut qui peut être d'ailleurs compensée par l'excès que donne la distorsion.

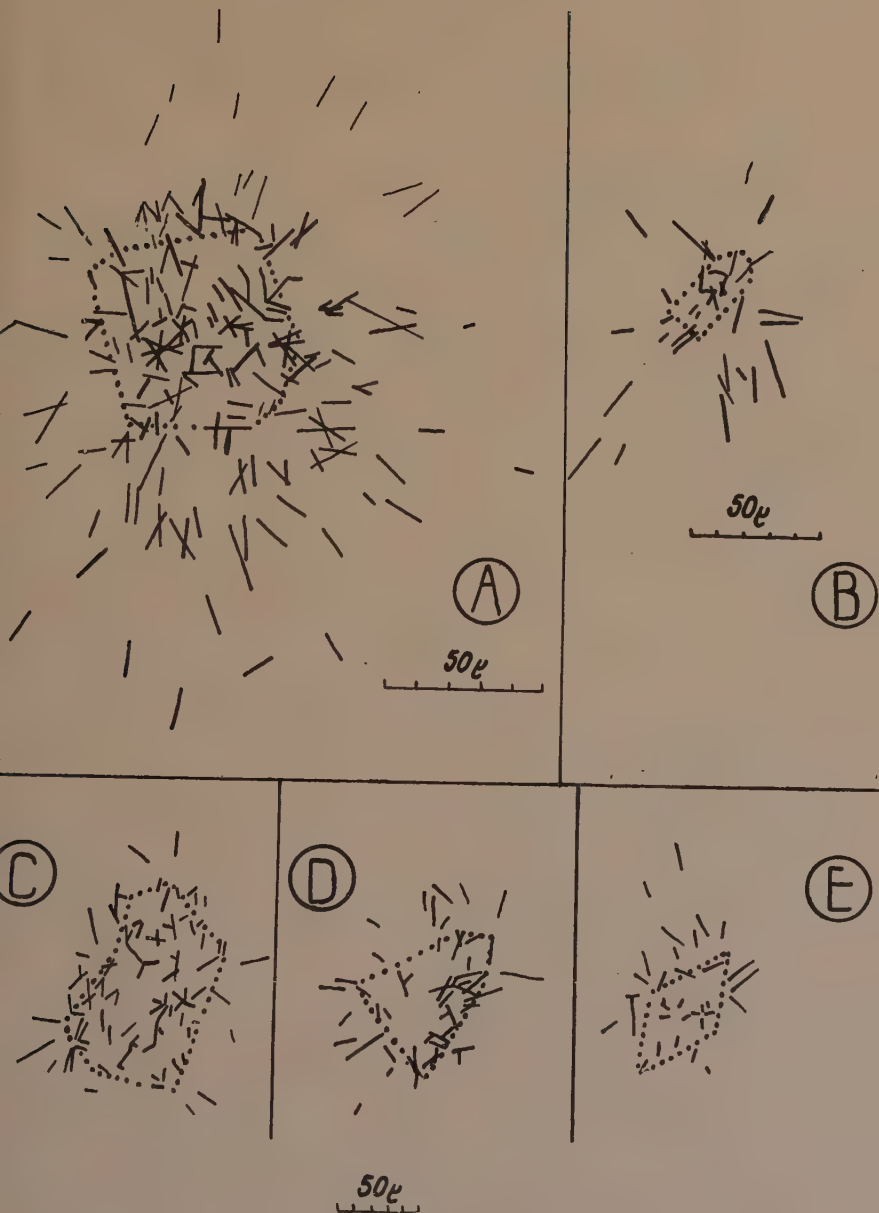


FIG. 22. — *Inclusion à faible teneur en uranium.*

Aucune trajectoire ne mesure plus de 7 cm. d'air.

A et B. — Granite de Bretagne.

C, D, et E. — Granite de Lignole-en-Vannes.

En examinant quelques inclusions de ce type trouvées dans deux granites polis, nous avons obtenu les résultats suivants :

ORIGINE DE LA ROCHE	TEMPS DE POSE (en h.)	SURFACE APPROXI- MATIVE (en μ^2)	NOMBRE DE RAYONS	N	C _U	FIG.
Granite de Bretagne	444	3.000	186	4,7	0,04	A
	210	270	40	19	0,14	B
Granite de Lignole	112	6.900	92	4	0,035	C
	112	2.800	51	4,5	0,04	D
	112	2.000	34	4,2	0,04	E

A part un cristal qui semble avoir une teneur en uranium de l'ordre de 14 %, tous les autres ont à peu près la même activité correspondant à une concentration d'environ 4 %.

Nous pouvons, en outre, constater qu'à l'intérieur des cristaux, la radioactivité n'est pas uniforme. Celle-ci, au contraire, semble provenir de quelques centres bien définis. Ainsi, en prolongeant toutes les trajectoires données par le cristal A (fig. 22), on peut voir que les rayons peuvent être émis par 17 ou 18 petites surfaces mesurant chacune environ 10 μ^2 . Certaines d'entre elles semblent émettre jusqu'à 20 ou 25 rayons α , ce qui leur donnerait une activité correspondant à une concentration de 60 % d'uranium. Cette dernière évaluation n'a été faite qu'avec de multiples erreurs : erreurs sur le nombre des trajectoires, car tel rayon que nous affectons à un centre pourrait être affecté à un autre situé également sur son prolongement, erreur sur l'évaluation de la surface, car les trajectoires inscrites assez loin du centre peuvent avoir subi une distortion. Nous devons donc considérer l'évaluation précédente comme très grossière. Elle tend, tout simplement, à prouver qu'il y a, à l'intérieur des cristaux, des centres très actifs et que de tels cristaux, brisés par pulvérisation, peuvent donner des grains dont l'activité est inférieure ou supérieure à celle de l'ensemble. Il ne serait donc pas extraordinaire de

trouver avec les roches pulvérisées des inclusions dont les teneurs en uranium seraient très variables.

C. — INCLUSIONS A FAIBLE TENEUR EN THORIUM.

§ 29. — **Existence et méthode de localisation de ces inclusions.**

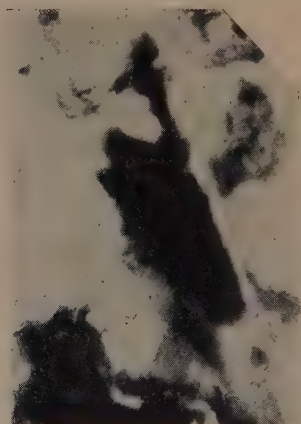
L'étude d'échantillons polis d'un granite de Bretagne (Collection de M. A. Demay), d'un granite de la région d'Angers et d'un granite de Locmalo (Morbihan) nous a prouvé l'existence de larges inclusions dont les dimensions dépassent souvent le millimètre et dont la radio-activité est assez grande.

Nous avons comme précédemment (paragraphe 23 et 27) repéré avec soin la position des agglomérations de rayons sur la plaque et déterminé leur origine sur le minerai.

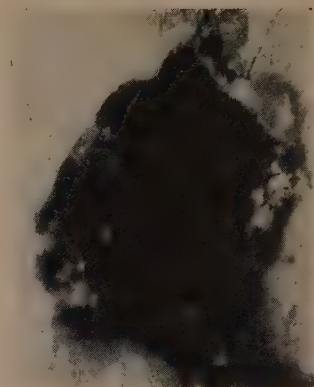
L'examen optique de celui-ci nous a permis de constater qu'à chaque large zone impressionnée par des rayons correspondait un cristal brun jaunâtre (fig. 23) dont l'identification n'est pas encore faite. En projetant sur le même écran d'abord les traces des particules α inscrites sur la plaque et ensuite le cristal qui semblait leur donner naissance, nous avons observé que ce dernier correspondait en forme, en grandeur et en orientation à l'ensemble des trajectoires observées (fig. 24). Cependant, nous avons dû choisir parmi les plaques obtenues, celles où l'inclusion se trouvait au contact de l'émulsion. En effet un cristal radio-actif placé sur la couche sensible impressionne cette dernière approximativement selon son contour, mais si ce cristal est séparé de l'émulsion par une mince couche d'air, la partie impressionnée s'élargit, tout en gardant cependant la forme primitive. C'est ainsi que l'inclusion 1 donne toujours une tache en triangle, la pointe en bas (fig. 25), et que l'inclusion 2 affecte toujours grossièrement une forme pentagonale.

Nous avons pu comparer facilement les diverses traces données par une même inclusion en superposant convenablement sur la platine du microscope trois plaques imprégnées

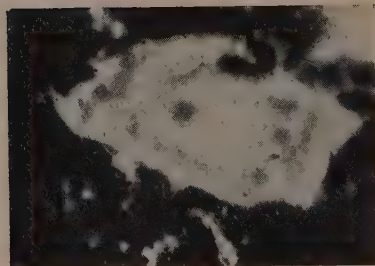
par le même échantillon de roche et en utilisant un objectif de faible grossissement. L'espace qui existe entre les plaques et l'objectif est assez grand pour permettre une mise au point successive sur les 3 émulsions.



A-1.



A-2.



A-5.

FIG. 23. — Photographies de cristaux radioactifs contenant une faible proportion de thorium (1 à 2 %).

A-1. Granite de Bretagne (Coll. de M. Demay). Cristal brun foncé inclus dans du quartz.

A-2. Granite de Bretagne. Cristal n° 2, cristal brun foncé inclus dans du quartz.

A-5. Granite de Bretagne. Cristal n° 5, cristal jaune brun inclus dans la biotite.

Il faut encore signaler que lorsque la roche est sur l'émulsion, on peut observer un grand nombre de trajectoires longues et qu'au contraire la roche séparée de l'émulsion par une mince couche d'air ne donne au centre que des trajectoires plongeantes qui, avec un faible grossissement, paraissent courtes et dont la mesure avec un fort grossissement devient

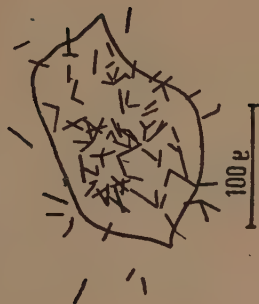


Fig. 24. — Inclusion à faible teneur en thorium. En projetant sur le même écran d'abord les traces des particules inscrites sur la plaque et ensuite le cristal qui semblait leur donner naissance, on peut observer que ce dernier correspond en forme, en grandeur, et en orientation à l'ensemble des trajectoires observées.

délicate. On n'obtient généralement, en ce cas, que quelques trajectoires à peu près parallèles à l'émulsion sur le pourtour



FIG. 25. — Calque des trajectoires données par le cristal I (granite de Bretagne de M. Demay). Le cristal bien appliqué sur l'émulsion a donné des rayons qui permettent la détermination de son contour.

de la tache. Ceci a une grande importance pour la détermination du rapport $\frac{C_{Th}}{C_U}$.

§ 30. — Mesure du rapport des concentrations
en thorium et en uranium.

Nous avons été frappés (fig. 27), en examinant les traces des particules α données par les précédentes inclusions de consta-

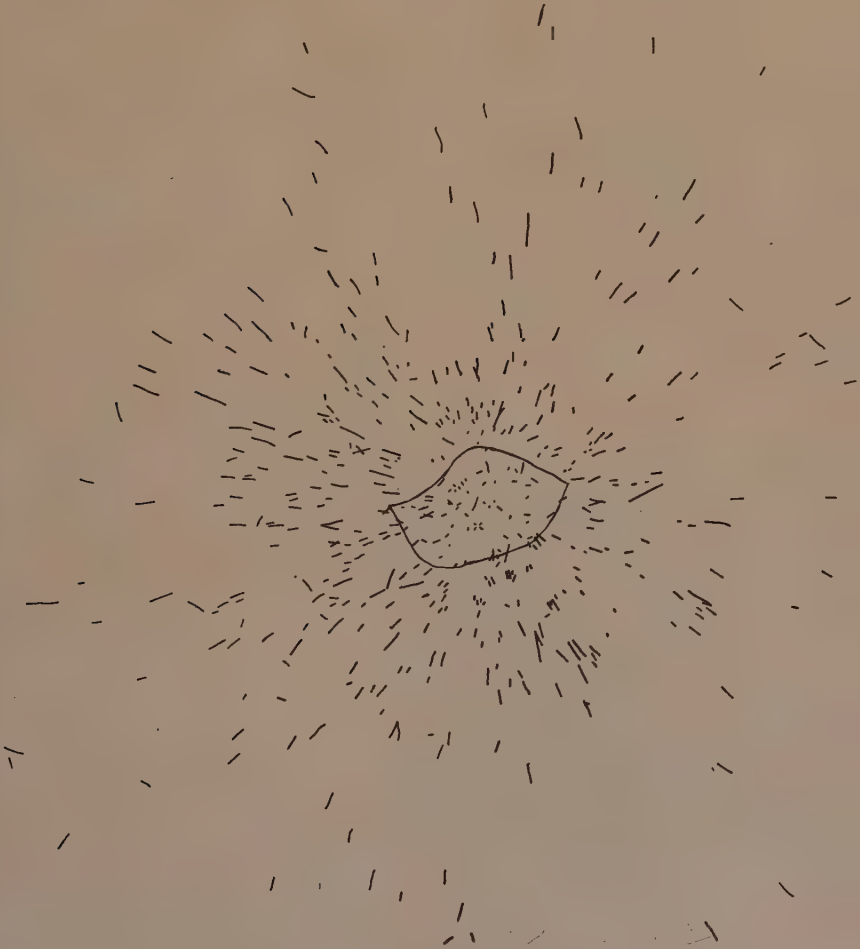


FIG. 26. — Une inclusion (n° 3, granite de M. Demay) séparée de l'émulsion par une mince couche inactive donne des rayons α disposés en étoile. Il est pratiquement impossible de déterminer le contour du cristal (dessiné au centre).

ter le nombre relativement grand des rayons du thorium C'. La mesure des longueurs des rayons α des concentrations les plus importantes nous a donné les résultats que nous indiquons dans le tableau suivant :

Origine	N ^{os} des inclusions	v_1	v_2	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{C_{Th}}{C_U}$
Granite de Bretagne. (Collection De M. Demay.)	1	12	8	0,65	∞
	1	11	11	1	16
	2	17	18	1	16
	2	65	51	0,54	24
	5	12	12		16
	5	11	9	0,82	160
Origine	N ^{os} des inclusions	v_1	v_2	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{C_{Th}}{C_U}$
Granite d'Angers	1	16	16	1	16
	2	57	38	0,66	∞
	3	40	28	0,7	∞
	4	28	25	0,89	36

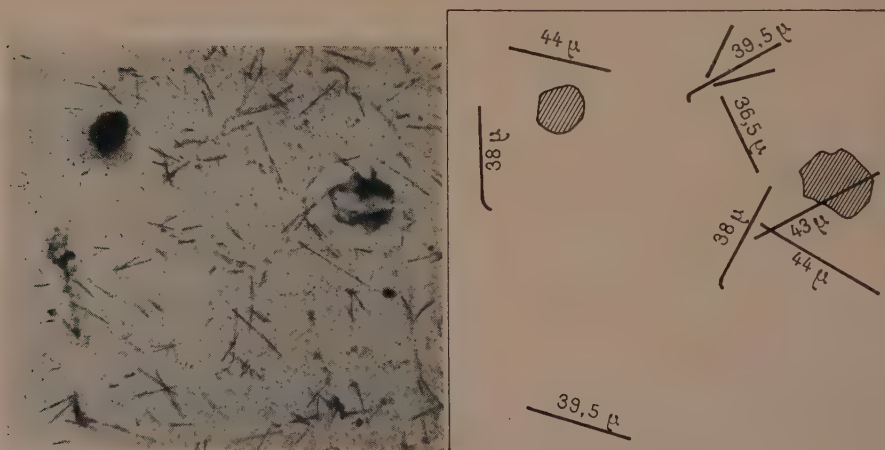


FIG. 27. — Inclusion à faible teneur en thorium. La mesure des longueurs des trajectoires montre un grand nombre de trajectoires mesurant plus de 7 cm. d'air et appartenant sans aucun doute au thorium C'.

Comme nous l'avons fait remarquer au paragraphe 3 les résultats obtenus par cette méthode ne peuvent être très précis parce que

le nombre des trajectoires observées n'est pas assez grand. Ils montrent cependant que les cristaux examinés contiennent une très forte proportion de thorium et peu ou pas d'uranium. On peut, croyons-nous, admettre qu'ils ne contiennent que du thorium.

§ 31. — Teneur en thorium de ces inclusions.

Les dimensions des cristaux et leur teneur en matières radioactives sont variables. Les mesures ont été faites en admettant qu'ils ne contiennent que du thorium. Nous avons choisi pour K' la valeur $K' = 20$ qui correspond à peu près au coefficient d'absorption des zircons. Cette valeur ne pourra être précisée que lorsque l'analyse chimique des cristaux aura été faite. Les résultats obtenus sont consignés ci-après :

Origine	Inclusion	N	$C_{Th} \times 100$	Surface (en mm^2)
Granite de Bretagne (Collection de M. Demay).	1	0,45	1,3	0,16
	2	0,40	1,2	0,47
	3	0,31	0,94	0,015
	4	0,50	1,5	0,08
	5	0,15	0,45	0,27

Origine	Inclusion	N	$C_{Th} \times 100$	Surface (en mm^2)
Granite d'Angers	1	0,53	1,0	0,5
	2	0,8	2,4	1,02
	3	0,74	2,2	1,2
	4	0,7	2,1	1,4
Granite de Locmalo	1	0,17	0,45	0,45

Ces résultats montrent que la teneur en thorium est variable non seulement d'une roche à une autre, mais d'un cristal à l'autre dans la même roche. Elle reste cependant toujours du même ordre de grandeur, soit 1 ou 2 %.

Des travaux indépendants effectués par Poole et Bremner signalent, dans un granite, l'existence de cristaux brun jaunâtre dont certains émettent des rayons α . Ces cristaux seraient

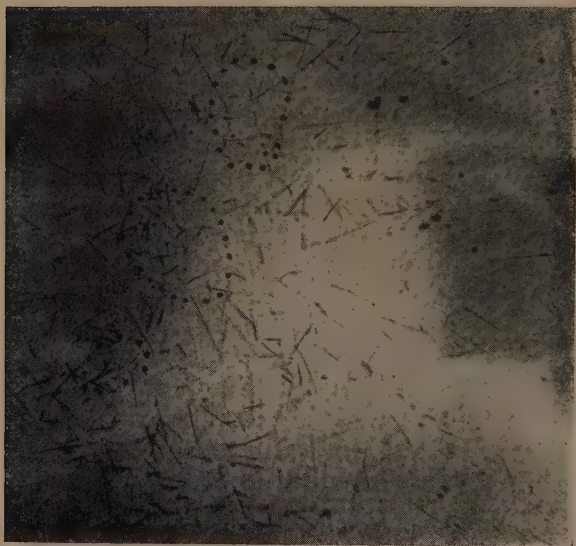


FIG. 28. — Trajectoires données par un cristal contenant une faible proportion de thorium.

On voit que la répartition de la radioactivité n'est pas uniforme. Sur cette photographie, certains rayons semblent être issus de quelques centres assez bien définis. L'emplacement d'un centre se remarque en effet facilement par l'aspect des trajectoires ; à cet endroit, elles sont émises à peu près perpendiculairement à l'émulsion et se présentent sous la forme de petits traits courts et non au point sur tout leur parcours. Nous avons dessiné sur le calque de la 1^{re} photographie :

en pointillé : les principaux centres d'émission,
 en traits pleins : les trajectoires qui semblent provenir de l'un des centres les plus importants.

des inclusions de mélanite ou de porovskite. Ces auteurs n'ont pas cherché à déterminer le rapport des concentrations en thorium et en uranium et, en admettant leur radioactivité due uniquement à l'uranium en équilibre avec leurs dérivés, ils arrivent à calculer une teneur moyenne de 0,3 % d'uranium. Si des examens ultérieurs montraient que ces cristaux contiennent seulement du thorium, leur concentration en thorium serait :

$$\frac{0,3 \times 8,6}{1,92} = 1,3 \text{ \% de thorium.}$$

Cette teneur correspond très exactement à celle que nous avons trouvée et il est possible que les cristaux mentionnés par Poole et Bremner soient identiques aux nôtres.

§ 32. — Répartition de la radioactivité à l'intérieur des cristaux.

A l'intérieur des cristaux la radioactivité n'est pas uniforme. Une simple observation des trajectoires des rayons émis par certaines inclusions (fig. 24 par exemple) montre que souvent ces rayons s'échappent en étoile des petites surfaces.

Très souvent 3, 4 ou 5 rayons semblent issus d'un même point. Il s'agit, sans doute, de filiations radioactives. En effet, la pose ayant duré au minimum 5 jours, si un atome de radiothorium émet une particule en donnant du thorium X, nous avons de grandes chances d'obtenir l'émission de 5 rayons, car en plus de celui du radiothorium, nous aurons ceux des éléments à vie courte suivants : thorium X (3,64 jours), thoron (54,5 sec.), thorium A (0,14 sec.), et thorium C (60,5 min.) ou thorium C' (10^{-6} sec.). L'atome émetteur ne se trouvant généralement pas sur la plaque, mais au-dessus, les rayons ne sont pas concourants, mais on trouve facilement l'origine par extrapolation des directions.

Parfois cependant, on peut remarquer un certain nombre de rayons α plus grands que 5 (de 6 à 13) qui semblent s'échapper d'une petite surface. Il est difficile de se rendre compte s'il s'agit de 2 ou 3 atomes de radiothorium voisins émettant

des rayons par filation radioactive ou s'ils s'agit de grains radioactifs inclus. En admettant cette dernière hypothèse, nous avons essayé de déterminer la concentration en thorium des

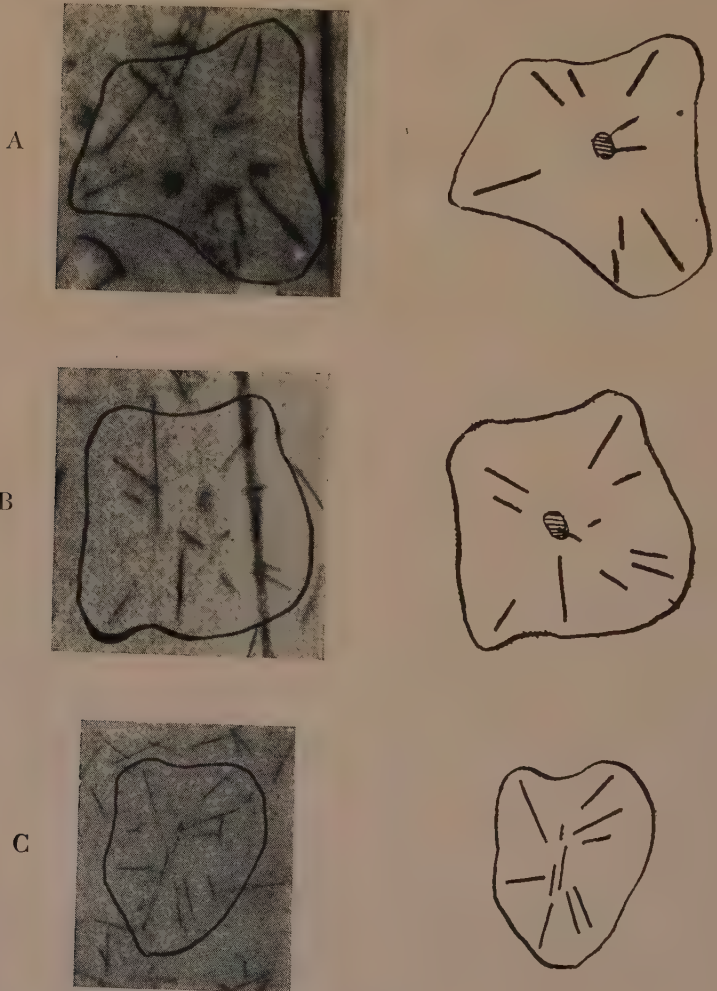


FIG. 29. — A. B. C. — Photographie montrant la répartition non uniforme de la radioactivité dans un cristal à faible teneur en thorium. Un certain nombre de trajectoires semblent provenir de petites surfaces nettement définies.

grains qui émettraient le même nombre de rayons. Voici les résultats de 2 mesures faites sur les inclusions du granite de Bretagne :

Cristal 4 : 12 trajectoires semblent s'échapper en 414 heures d'une surface de $38 \mu^2$.

$$N = 21 \quad C_{Th} = 53 \, \%$$

Cristal 3 : 8 trajectoires semblent s'échapper en 414 heures d'une surface de $24 \mu^2$.

$$N = 24 \quad C_{Th} = 57 \, \%$$

De nombreuses mesures du même genre ont donné les résultats rassemblés dans le tableau suivant :

N	$C_{Th} K'$	C_{Th}	N	$C_{Th} K'$	C_{Th}
21	10,9	53	24	12,5	57
20	10,4	52	33	17,2	68
46	24	80	29	16	64
29	16	64	46	24	80
17	9	45	48	25	82
49	25,2	83	23	12	55
40	21	75	39	20,5	70
45	23,5	78	49	25,2	83
40	21	75	42	22	77
26	16	58	48	25	82

La moyenne des résultats atteint la valeur de 69 %, ce qui laisse supposer que les grains radioactifs inclus ont, s'ils existent, une forte teneur en thorium, teneur qui correspondrait à peu près à celle de la thorite ThO_2 , SiO_2 (71 %).

CHAPITRE VIII

RÉPARTITION DE LA RADIOACTIVITÉ DANS QUELQUES ROCHES POLIES

Nous avons essayé de nous rendre compte de l'activité existant dans les roches en dehors des inclusions mentionnées précédemment. Nous avons en particulier étudié 3 échantillons de granite : celui de M Demay, celui de la région d'Angers et celui de Lignole-en-Vannes (Morbihan).

§ 33. — Granite de Bretagne.

Nous reproduisons (fig. 30) le contour de la surface de cet échantillon et la position des principales inclusions.



FIG. 30. — Répartition de la radioactivité dans les roches. Échantillon de granite poli. Granite de Bretagne (Coll. de M. Demay). Grandeur naturelle.

- Inclusions à forte teneur en uranium,
- Inclusions à faible teneur en uranium,
- Inclusions à forte teneur en thorium,
- Inclusions à faible teneur en thorium.

En étudiant la teneur globale en matières radioactives (§ 20) à l'aide de la roche polie et de la roche pulvérisée, nous avons trouvé environ 0,0070 trajectoire par heure et par champ de microscope, ce qui donne par cm^2 et par seconde une émission d'environ $N = 0,0020$ trajectoire.

D'autre part, nous avons déterminé le nombre des rayons émis par cm^2 et par seconde par les principales inclusions et nous avons évalué leur surface approximative. Nous pouvons donc calculer le nombre de rayons émis par seconde par les inclusions examinées :

Nous trouvons :

1° *Inclusions à forte teneur en uranium (a) :*

$$N = 200 \quad S = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$$

d'où $n_1 = 200 \times 4,9 \cdot 10^{-5} = 0,0098.$

2° 10 inclusions à faible teneur en uranium :

$$N = 5 \quad \text{Surface totale } 7. 10^{-5} \text{ cm}^2$$

$$N_2 = 5 \times 7. 10^{-5} = 0,00035.$$

3° Grandes inclusions à faible teneur en thorium :

inclusion 1	$0,43 \times 0,0016$	$= 0,000688$
— 2	$0,40 \times 0,0047$	$= 0,00188$
— 3	$0,31 \times 0,00015$	$= 0,000046$
— 4	$0,5 \times 0,0008$	$= 0,00040$
— 5	$0,15 \times 0,00027$	$= 0,000405$
— 6 et 7	$0,7 \times 0,0013$	$= 0,00052$

soit au total :

$$n_3 = 0,00394.$$

En dehors de ces inclusions, l'examen d'une plaque obtenue avec une pose de 210 heures montre un certain nombre de trajectoires isolées ou groupées par 3 ou 4. On trouve en moyenne 0,050 trajectoire par champ de microscope, ce qui donne par cm^2 et par seconde environ 0,00082 trajectoire. Comme l'échantillon a une surface d'environ $9,8 \text{ cm}^2$, on peut admettre qu'il y a par seconde, en dehors des inclusions, émission de $0,00082 \times 9,8 = 0,0081$ trajectoire. Il y a donc, au total, pour $9,8 \text{ cm}^2$:

$$0,0098 + 0,00035 + 0,00394 + 0,0081 = 0,02219$$

trajectoire par seconde, soit par seconde et cm^2 :

$$0,02219/9,8 = 0,0022$$

ce qui correspond bien à la valeur de 0,002 trouvée précédemment (§ 22).

De ce calcul nous pouvons déduire que sur 0,02219 trajectoire, il y en a

$$0,0098 + 0,00035 + 0,00394 = 0,01409$$

qui sont émises par les inclusions étudiées, soit environ $141/222 = 63 \%$.

Nous devons cependant remarquer que si la roche polie n'est pas très plane ou si l'émulsion photographique n'a pas une

épaisseur constante, il peut se trouver en certains endroits entre l'émulsion et la plaque une mince couche d'air. En ce cas, des rayons α peuvent s'inscrire très loin de leur origine et des trajectoires que l'on considère comme isolées doivent normalement être rattachées à une inclusion.

Notons encore qu'en dehors des inclusions la répartition des traces n'est pas homogène. On peut observer parfois 50 ou 100 champs de microscope sans découvrir un seul rayon α et trouver tout à coup 4 et 5 rayons groupés. Il s'agit là sans doute d'une inclusion à très faible radioactivité ou d'une inclusion d'activité moyenne mais de très petites dimensions.

L'étude des inclusions nous montre que les inclusions à uranium émettent $0,0098 + 0,00035 = 0,01015$ trajectoire et que les inclusions à thorium en émettent 0,00394. On sait que le nombre de rayons visibles émis par l'uranium est 8,6 $C_u K'$ et que celui des rayons émis par le thorium est 1,92 $C_{Th} K'$. Il en résulte que le rapport des concentrations C_{Th}/C_U en thorium et en uranium déduit de la composition des inclusions étudiées est :

$$\frac{C_{Th}}{C_U} = \frac{394}{1,92} : \frac{1015}{3,6} = 1,8.$$

Ce rapport est inférieur à celui trouvé précédemment (§ 19) et qui est égal à 2,8, mais reste néanmoins du même ordre de grandeur. Ce résultat tendrait à prouver que les trajectoires isolées seraient en grande partie dues à du thorium. La vérification n'est guère possible, car la mesure des longueurs d'un grand nombre de trajectoires isolées est rendue très difficile par le fait même de leur dissémination.

§ 34. — Granite d'Angers.

Nous avons étudié la radioactivité de ce granite à l'aide d'un échantillon beaucoup plus grand que le précédent. Nous avons à notre disposition une plaque polie rectangulaire de 10 cm. $\times$ 7,3 cm. Pour faciliter le repérage des inclusions nous avons brisé cette plaque en plusieurs morceaux dont nous

reproduisons les contours sur la fig. 31. Nous indiquons également sur cette figure la position des principales inclusions. Une partie (angle gauche) a été réservée et la roche polie étudiée représente une surface de 60 cm^2 .

Nous pouvons calculer, comme pour le granite de Bretagne, le nombre de rayons émis par seconde. Sur cette surface, nous avons trouvé :

1° 3 inclusions à forte teneur en uranium

(a, b, d) $N = 200$
surface totale approximative $14,10^{-5} \text{ cm}^2$

d'où

$$n_1 = 200 \times 14,10^{-5} = 0,028.$$

2° 2 inclusions à faible teneur en uranium

$N = 5$ surface = $4,10^{-6} \text{ cm}^2$

d'où

$$n_2 = 5 \times 4,10^{-6} = 0,000020.$$

3° 1 inclusion à forte teneur en thorium

$N = 33$ $S = 15,10^{-5} \text{ cm}^2$

$$n_3 = 33 \times 15,10^{-5} = 0,005.$$

4° 4 inclusions à faible teneur en thorium

$$\text{inclusion 1 } 0,33 \times 0,005 \text{ cm}^2 = 0,00165$$

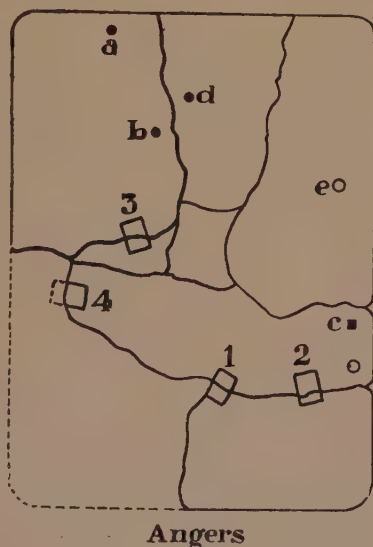
$$\text{— 2 } 0,8 \times 0,0102 \text{ cm}^2 = 0,00816$$

$$\text{— 3 } 0,74 \times 0,012 \text{ cm}^2 = 0,00888$$

$$\text{— 4 } 0,7 \times 0,014 \text{ cm}^2 = 0,00980$$

soit au total

$$n_4 = 0,02849.$$



Angers

FIG. 31. — Échantillon de granite poli.
Granite d'Angers.

Mêmes conventions que ci-dessus.
On remarque que les inclusions à faible teneur en Th sont sur les lignes de rupture.

En dehors des inclusions se trouvent quelques trajectoires qui semblent isolées. Les mesures ont été faites sur une plaque

qui a donné pour les inclusions fortes des impressions bien nettes, c'est-à-dire une plaque qui a eu pendant la pose un contact bien assuré avec la roche. Le calcul nous donne alors en moyenne en dehors des inclusions 0,00045 trajectoire par seconde et par cm^2 soit pour l'ensemble de l'échantillon

$$n_s = 0,00045 \times 60 = 0,0270.$$

Au total, pour 60 cm^2 , il y a donc émission de :

$$0,028 + 0,000020 + 0,005 + 0,02849 + 0,027 = 0,08851 \text{ trajectoire, soit par seconde et par } \text{cm}^2 :$$

$$N = 0,08851/60 = 0,00147$$

ce qui donne une teneur légèrement inférieure à celle de l'échantillon précédent.

On constate que pour :

$$0,028 + 0,000020 + 0,005 + 0,02849 = 0,06151 \text{ trajectoire émise par les inclusions étudiées, il y a } 0,027 \text{ trajectoire isolée. L'activité des inclusions représente donc :}$$

$$\frac{615}{615 + 270} = 0,69, \text{ soit } 69 \% \text{ de l'activité totale.}$$

Nous ferons cependant, à propos de ce calcul, les mêmes réserves que précédemment.

D'autre part, on voit que les inclusions donnent :

$$0,028 + 0,00002 \text{ rayon provenant de l'uranium pour } 0,02849 + 0,005 = 0,0335 \text{ rayon provenant du thorium. Il en résulte que le rapport des concentrations en thorium et en uranium pour l'ensemble des inclusions étudiées est :}$$

$$\frac{C_{\text{Th}}}{C_{\text{U}}} = \frac{335}{1,92} : \frac{380}{8,6} = 5,4.$$

Ce rapport est très supérieur à la moyenne trouvée pour les autres roches, sans toutefois dépasser les limites indiquées par d'autres auteurs. Ce résultat pourrait faire penser que tous les rayons isolés proviennent de l'uranium. En ce cas, le rapport devient 2,7, ce qui est plus conforme aux valeurs trouvées antérieurement. On peut se demander également si le polissage de la roche, polissage effectué sans précautions spéciales

par un granitier, n'a pas arraché à cette dernière un certain nombre de petites inclusions placées en surface.

A propos de la répartition de la radioactivité à l'intérieur de la roche, nous devons signaler un fait particulier qui a attiré notre attention. Comme nous l'avons dit au début de ce paragraphe, nous avons dû briser la roche en plusieurs morceaux afin de faciliter son étude. Nous l'avons fait en donnant un coup de marteau au centre du côté de la face non polie. L'étude photographique montre alors que les grosses inclusions à faible teneur en thorium (§ 28) se trouvent toutes à cheval sur les lignes de rupture (voir fig. 31). On peut alors se demander si les cristaux radioactifs se sont formés aux endroits fragiles ou si, inversement, la résistance de la roche n'a pas été affaiblie par la présence de ces cristaux ou par des phénomènes de radioactivité.

§ 35. — Granite de Lignole et Micasciste de Quiberon.

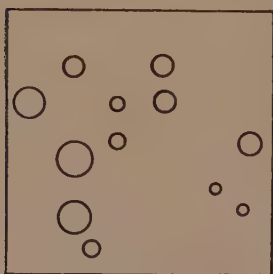
Nous n'avons pu, pour le granite de Lignole, étudier la répartition en dehors des inclusions, car la roche mal polie ne s'applique pas exactement sur l'émulsion. Il en résulte que les traces des trajectoires rayonnent et se dessinent parfois loin des inclusions.

Nous voulons cependant signaler que la répartition de la radioactivité dans ce granite est complètement différente de la répartition dans ceux étudiés précédemment. Au lieu de voir des inclusions (dont certaines ont des dimensions de l'ordre du mm^2) assez éloignées les unes des autres, nous nous trouvons ici en présence d'un très grand nombre d'inclusions très petites et très voisines. On en compte en moyenne 10 ou 12 par centimètre carré, et leurs dimensions sont de l'ordre de celles signalées au paragraphe 25, soit de 1.000 à 6.000 μ^2 (fig. 32).

Parmi elles on distingue des inclusions à faible teneur en uranium et à faible teneur en thorium, mais toutes ne peuvent pas être analysées en raison de leurs petites dimensions et de leur distance à la plaque. La figure représente 1 cm^2 de plaque

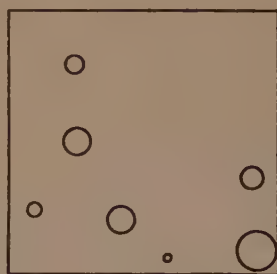
avec la place des inclusions. La grandeur du cercle indique à peu près l'importance de l'activité.

Le micaschiste de Quiberon, qui n'a pas été poli, car la roche, trop tendre, ne le permet pas, mais seulement dressé, montre une répartition de la radio-activité analogue mais dans l'ensemble moins importante. On ne compte en effet en moyenne que 5 ou 6 inclusions par cm^2 (fig. 33). Les dimensions des inclusions semblent être du même ordre de grandeur que celles du granite de Lignole, soit quelques milliers de μ^2 .



Lignole (*granite*)

FIG. 32. — Échantillon d'un granite de Lignole (Morbihan). Représentation de 1 cm^2 de plaque. Les dimensions relatives des cercles correspondent aux activités relatives des inclusions.



Quiberon (*micaschiste*)

FIG. 33. — Échantillon d'un micaschiste de Quiberon (Morbihan). Représentation de 1 cm^2 de plaque. Mêmes conventions que ci-dessus.

CHAPITRE IX

ÉTUDE DES INCLUSIONS

RENCONTRÉES DANS LES ROCHES PULVÉRISÉES

§ 36. — Grains radioactifs placés sur l'émulsion.

L'étude des plaques impressionnées par des roches pulvérisées nous conduit, ce qui est normal, à la découverte de cristaux radioactifs semblables à ceux rencontrés dans les roches polies.

Certains, très actifs, ont pu être identifiés avec certitude comme ceux à très forte concentration en thorium trouvés

dans le sable de Pénestin et le concentré du granite de Bretagne que nous avons signalés au paragraphe 25.

Généralement cependant, l'identification est très difficile, sinon impossible. Les grains sont en effet très petits, leur surface varie de quelques dizaines à quelques centaines de microns carrés et ils n'émettent de ce fait qu'un nombre restreint de rayons α .

Lorsque le grain radioactif est sur l'émulsion, ce qui est très rare, la mesure de l'activité globale peut se faire dans d'assez bonnes conditions (fig. 34). Les trajectoires dessinent approximativement le contour du cristal dont on peut évaluer la surface avec une précision suffisante. Connaissant d'autre part le temps de pose et le nombre de rayons émis, il serait possible de déterminer les concentrations en uranium et en thorium si l'on connaissait, au moins approximativement, le rapport C_{Th}/C_U . Or ce rapport ne peut être déterminé en raison du nombre restreint des trajectoires. En effet une pose courte ne peut donner qu'un très petit nombre de rayons, une pose longue donne un nombre plus grand, mais comme la surface est très petite, on arrive rapidement à un enchevêtrement de trajectoires et l'évaluation des longueurs ne peut se faire de façon satisfaisante. D'ailleurs la meilleure des inclusions placée sur l'émulsion nous donne 72 trajectoires en 18 jours. En 3 mois, limite pratiquement imposée par le fading, on en aurait environ 350, ce qui est encore insuffisant pour une détermination sérieuse du nombre des rayons de parcours supérieurs à 7 cm. d'air et compris entre 5,8 et 7 cm.

Il n'y a qu'un moyen d'arriver à ce résultat, c'est d'isoler le grain radioactif intéressant et d'obtenir, avec toute une série de poses courtes, des photographies qui permettraient la mesure d'un grand nombre de rayons nettement définis et provenant d'une même source. Ceci ne pourrait être obtenu que par l'emploi de frottis à grains très espacés qui permettraient après la mise en évidence de la radioactivité d'un grain de repérer celui-ci et de l'isoler.

Dans les calculs qui suivent, nous admettons que les grains contiennent soit de l'uranium, soit du thorium et nous donnons

les teneurs dans les 2 cas. D'après les observations faites avec les roches polies, ceci semble en général très près de la réalité, car nous n'avons jamais rencontré de cristaux contenant à la



FIG. 34. — Grains radioactifs rencontrés dans les poudres. Grain radioactif rencontré dans le mica-schiste de Quiberon pulvérisé. Ce grain se trouve au contact de l'émulsion.

fois uranium et thorium avec des teneurs du même ordre de grandeur. Les seuls cristaux mixtes contenaient en effet 70 % d'uranium et quelques centièmes de thorium au maximum.

Nous déterminerons donc le nombre N des rayons α émis par cm^2 et par seconde et nous appliquerons successivement les deux formules :

$$8,6 C_U K' = N$$

$$\text{et } 1,92 C_{Th} K' = N$$

qui donneront les produits $C_U K'$ et $C_{Th} K'$ et le graphique du § 8 fixera immédiatement les teneurs C_U et C_{Th} .

Les résultats obtenus par l'étude de quelques inclusions placées sur l'émulsion sont indiquées ci-après :

ORIGINE	TEMPS DE POSE (EN JOURS)	NOMBRE DE RAYONS	SURFACE D'ÉMISSION	N	C_U ou C_{Th}	
Micaschiste de Quiberon	7	28	90	61	0,38	0,90
	18	33	53	88	0,48	?
	18	72	46	74	0,43	?
Sable	9	46	93	63	0,39	0,92
La Trinité-sur-mer	9	6	33	24	0,18	0,57

Les 4 premières inclusions ont des teneurs à peu près égales, soit environ 40 % d'uranium ou 90 à 100 % de thorium. Il semble logique de ne pas les considérer comme formées uniquement de thorium, car la concentration semble exagérée,

l'oxyde de thorium ne contenant que 84 % de thorium. D'autre part, si leur teneur en thorium était si élevée, on devrait trouver, sur les 179 trajectoires examinées, quelques trajectoires mesurant plus de 7 cm. d'air et les mesures faites n'ont pas permis d'en déceler une seule. Nous pouvons donc admettre qu'elles renferment de l'uranium avec peu ou pas de thorium.

Ces grains radioactifs pourraient provenir d'inclusions à faibles teneurs en uranium dont nous avons parlé au paragraphe 28 et dont l'activité n'est pas uniforme.

§ 37. — **Grains radioactifs séparés de l'émulsion par une mince couche inactive.**

Les photographies montrant l'inclusion au contact de l'émulsion sont très rares. Généralement le grain radioactif se trouve séparé de celle-ci par une mince couche d'air ou une matière inerte (fig. 35). Il est cependant encore souvent possible, en prolongeant les trajectoires les plus voisines de la source de déterminer approximativement le contour du cristal émetteur. Nous donnons ci-après les résultats obtenus avec quelques inclusions dont les trajectoires, bien que non concourantes, ne s'éloignent pas trop d'un centre d'émission unique.

L'inclusion 1 avec 75 % d'uranium semble être de même nature que les cristaux riches en uranium déjà examinés au paragraphe 26.

Les inclusions 2 et 3 paraissent formées de grains radioactifs des cristaux à faible teneur globale en uranium mentionnés au paragraphe 28. Il en est peut-être de même de l'inclusion 4.

Celles qui portent les numéros 5, 6, 7, 8, 9 peuvent être comme les précédentes issues de cristaux à faible teneur globale en uranium, mais peuvent aussi provenir de cristaux à

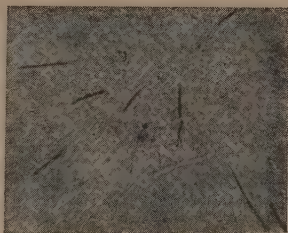


FIG. 35. — Grain radioactif séparé de l'émulsion, au moment de la pose par une mince couche inactive.

faible teneur en thorium. Nous devons cependant remarquer que seule l'inclusion trouvée dans le granite du Faouët a donné naissance à une trajectoire de plus de 7 cm. d'air.

ORIGINE	TEMPS DE POSE	NOMBRE DE RAYONS	SURFACE D'ÉMISS- SION	N	C _U	C _{Th}	OBS.
1. Granite Ro- se. Roscan- vel.....	140 h.	13	12	192	0,75	?	
2. Granite Bretagne...	340 h.	17	20	68	0,55	?	
3. Granulite Quiberon...	7 j.	11	33	65	0,55	?	
4. Granite Bretagne...	340 h.	20	32	50	0,35	0,85	
5. Micaschiste Quiberon...	18 j.	5	9	36	0,25	0,70	
6. Granite Le Faouët.....	140 h.	38	210	35	0,25	0,69	
7. Granulite Arradon....	120 h.	22	200	34	0,25	0,69	1 tra. de 40 μ .
8. Granulite. Roscanvel...	140 h.	12	72	33	0,24	0,68	
9. Micaschis- te Quiberon.	18 j.	20	35	15	0,13	0,42	

§ 38. — Grains radioactifs à plusieurs centres d'émission.

Enfin certains grains, sans doute plus gros que les précédents, émettent des rayons qui ne partent pas d'une seule petite surface radio-active, mais qui, au contraire, sont issus de plusieurs centres. Ces aspects se rencontrent surtout dans l'examen des plaques impressionnées par les sables naturels. Elles sont plus rares et moins nettes sur les plaques obtenues avec les roches pulvérisées par nos soins. Il s'agit certainement d'une question de grosseur de grains.

L'identification des cristaux émetteurs, sans être absolue, est évidemment beaucoup plus facile qu'avec les très petites inclusions. Il y a donc, pour cette raison encore, intérêt à ne pas pulvériser les roches trop finement.

La mesure du nombre de rayons émis par cm² et par seconde est assez facile, car si la plage est assez étendue, il suffit de

dessiner, au centre de la photographie, une figure géométrique simple ayant une surface facilement calculable et de compter le nombre de trajectoires qu'elle renferme. On peut même, sans prendre de photographies ni de calques, se contenter d'évaluer le nombre de rayons visibles dans le champ du microscope. L'erreur introduite est uniquement une erreur de statistique, celle provenant de l'appréciation du contour du cristal est supprimée. Elle peut être cependant assez grande en raison du nombre réduit des trajectoires. Ces inclusions se classent nettement en 2 catégories, comme l'indique le tableau suivant.

ORIGINE	SURFACE EXAMI- NÉE (en μ^2)	NOMBRE DE RAYONS	TEMPS DE POSE	N	C _U OU C _{Th}		OBSER- VATIONS
Sable. Plage des « Amé- ricains », Trinité-s.- mer.....	5.000	44	70 h.	3,2	0,14	0,50	Aucune trajectoire de plus de 7 cm. d'air.
Granulite Gravi'Inis. Golfe du Morbihan..	10.000	72	100 h.	2	0,02	0,07	
Sable. Pé- nestin.Mor- bihan.....	12.000	106	72 h.	3,2	0,14	0,50	
Granite de Lignole. Morbihan.	6.000	54	95 h.	0,26	0,002	0,01	6 trajectoi- res de plus de 7 cm. d'air.
Micaschiste de Quibe- ron.....	2.500	10	18 j.	0,25	0,002	0,01	3 trajectoi- res de plus de 7 cm. d'air.
Graniterose. Roscanvel.	10.000	12	140 h.	0,25	0,002	0,01	10 trajectoi- res de plus de 7 cm. d'air sur 100.

Les 3 premières inclusions émettent 2 ou 3 rayons par cm^2 et par seconde. Sur 219 trajectoires observées nous n'en avons pas trouvé une seule ayant un parcours supérieur à 7 cm. d'air. Ces inclusions peuvent être sans doute assimilées à celles étudiées dans le paragraphe 28 (Inclusions à faible teneur en uranium).

Les 3 dernières, au contraire, émettent en moyenne 0,25 trajectoire par cm^2 et par seconde. On observe en outre un grand nombre de rayons du thorium C'. Ce sont donc des cristaux semblables à ceux mentionnés dans le paragraphe 31 (Inclusions à faible teneur en thorium).

CHAPITRE X

LA RADIOACTIVITÉ DU SABLE DES PLAGES DE LA RIVIÈRE DE CRAC'H (MORBIHAN)

§ 39. — Variation de l'activité avec la situation de la plage.

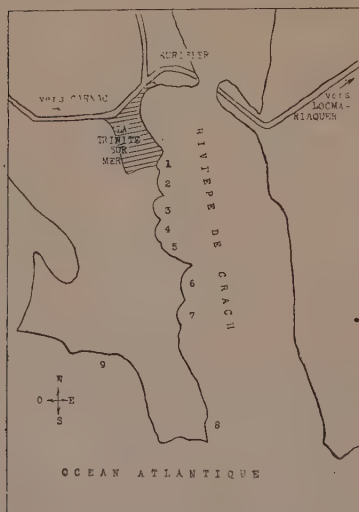


FIG. 36. — Carte des plages de la rivière de Crac'h.

Par suite d'une lévigation naturelle, le sable de la plage des Demoiselles à Penestin (Morbihan) se trouve formé, en grande partie, d'éléments lourds (cassitérite, or natif, magnétite, etc.). Il était donc naturel d'y rencontrer les cristaux radioactifs généralement inclus dans les roches. Nous avons plusieurs fois mentionné la radioactivité de ce sable.

Cette concentration naturelle d'éléments radioactifs sur certaines plages ne semble pas particulière aux rivages de la Vilaine sur lesquels se trouve

Pénestin, et nous avons mis en évidence un phénomène du même genre sur ceux de la rivière de Crac'h (Morbihan).

Celle-ci n'est alimentée que par un ruisseau, mais la mer remonte assez loin dans les terres et l'influence de la marée se fait sentir à plusieurs kilomètres. De la Trinité-sur-mer à l'océan, s'étalent sur 3 kilomètres un grand nombre de petites plages de 100 à 300 mètres de long séparées par des pointes rocheuses. Sur l'océan même se trouve la plage de Kervilaine (fig. 36).

La mesure, par l'impression d'une émulsion photographique de la radioactivité du sable de ces plages, a donné les résultats caractéristiques suivants :

	Nombre de rayons émis par cm ² et par seconde
Plage 1. — Poste des Douanes.....	0,08. 10 ⁻³
— 2. —	0,10. 10 ⁻³
— 3. — Plage des « Américains ».....	6. 10 ⁻³
— 4. — Plage de Kerhino.....	0,06. 10 ⁻³
— 5. —	0,11. 10 ⁻³
— 6. — Plage de Coëthbihan.....	0,13. 10 ⁻³
— 7. — Plage de Kerbihan.....	2. 10 ⁻³
— 8. — Plage de Ty Gward.....	0,08. 10 ⁻³
— 9. — Plage de Kervilaine.....	0,05. 10 ⁻³

Le sable de la plage des « Américains » n'a pas une activité constante. La valeur donnée dans le précédent tableau est une moyenne. L'échantillon le plus actif a montré 14. 10⁻³ trajectoires par seconde et par cm² et le plus faible 2. 10⁻³ trajectoires. Les autres plages ont, au contraire, une activité régulière.

Dans l'ensemble on peut donc constater que le sable des « Américains » et celui de Kerbihan ont des teneurs en matières radioactives bien supérieures à celles du sable des plages voisines. Comme tous ces sables ont vraisemblablement même origine et que les terrains en bordure sont identiques, on ne peut concevoir l'enrichissement que par une lévigation naturelle.

Notons que la plage de Kerbihan a perdu, il y a quelques années, sous l'action d'une forte marée, le sable dont elle était recouverte et qu'elle est actuellement faite de galets sous lesquels nous avons prélevé le sable étudié. Il est possible que lors de l'accomplissement de ce phénomène, les grains les plus lourds soient restés, ce qui expliquerait la forte teneur par rapport aux plages voisines.

§ 40. — **Nature des inclusions rencontrées dans les sables.**

Les inclusions radio-actives rencontrées dans les sables les plus riches sont de 2 types.

Type A : Aucune trajectoire de plus de 7 cm. d'air ou 38 μ . d'émulsion [Th C']. Il s'agit sans doute d'inclusions à faible teneur en uranium (Quelques unités pour cent).

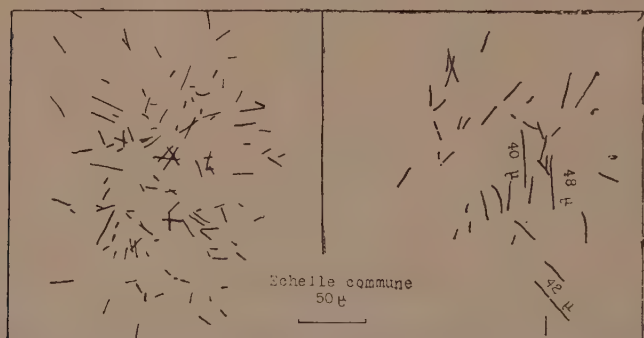


FIG. 37. — Les deux types d'inclusions radioactives contenues dans le sable de la plage des « Américains » à la Trinité-sur-mer (pose : 70 heures).

Type A : aucune trajectoire de plus de 7 cm. d'air pouvant être attribuée au Th C'. Sans doute inclusions à faible teneur en uranium (quelques unités pour cent).

Type B : plusieurs trajectoires de Th C'. Sans doute inclusions à faible teneur en Th (1 à 2 %).

Type B : Plusieurs trajectoires de thorium C'. Il s'agit sans doute d'inclusions à faible teneur en thorium (Ordre de 1 ou 2 %).

Il est difficile de déterminer dans ces sables le rapport

C_{Th}/C_U des concentrations en thorium et en uranium, car le nombre des trajectoires longues est réduit. Si l'on admet la valeur $C_{Th}/C_U = 3$ généralement adoptée pour les roches granitiques, les teneurs en matières radioactives des sables sont les suivantes :

Plage des Américains	$C_U = 2,58 \cdot 10^{-5}$	$C_{Th} = 7,7 \cdot 10^{-5}$
Plage de Kerbihan	$C_U = 0,86 \cdot 10^{-5}$	$C_{Th} = 2,6 \cdot 10^{-5}$
Autres plages	$C_U = 0,04 \cdot 10^{-5}$	$C_{Th} = 0,13 \cdot 10^{-5}$

CONCLUSIONS

L'étude de la radioactivité de quelques roches acides nous permet de tirer, pour ces roches, les conclusions que nous résumons ci-après :

1° Le rapport des concentrations en thorium et en uranium varie, en général, pour l'ensemble des roches étudiées entre 2 et 3. Il semble cependant y avoir quelques exceptions, pour lesquelles la proportion de thorium serait légèrement supérieure.

2° La concentration moyenne en matières radioactives est généralement de l'ordre de $0,75 \cdot 10^{-5}$ d'uranium et de $2,5 \cdot 10^{-5}$ de thorium. Quelques roches assez rares ont des teneurs nettement plus faibles, mais aucune n'a paru inactive. Certaines par contre dépassent la moyenne et atteignent 2 ou 3 fois ces valeurs.

3° La radioactivité des roches provient, en majeure partie (au moins 60 à 70 %) de cristaux radioactifs inégalement répartis dont la composition, les teneurs et les dimensions sont différentes. Nous avons cependant pu grouper toutes les inclusions observées en quatre catégories.

a) Inclusions à forte teneur en uranium.

Ces inclusions contiennent environ 70 % d'uranium et quelques centièmes de thorium. Leur surface est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres carrés.

b) Inclusions à forte teneur en thorium.

Ces inclusions contiennent environ 70 % de thorium et peu ou pas d'uranium. Leur surface, du même ordre de grandeur que celle des inclusions précédentes, est de quelques dixièmes de millimètres carrés.

c) *Inclusions à faible teneur en uranium.*

La teneur en uranium de ces inclusions est variable mais elle reste de l'ordre de quelques unités pour cent. Leurs surfaces, également variables, sont de quelques centaines à quelques milliers de microns carrés.

d) *Inclusions à faible teneur en thorium.*

Elles contiennent 1 ou 2 % de thorium et peu ou pas d'uranium. Leurs surfaces sont souvent très grandes par rapport à celles des précédentes inclusions, elles atteignent l'ordre du millimètre carré.

Les cristaux mentionnés dans les paragraphes *c* et *d* n'ont pas une radioactivité uniforme. Ils semblent au contraire contenir des grains à forte teneur en matières radioactives, soit environ 50 % d'uranium pour les cristaux *c* et 70 % de thorium pour les cristaux *d*. La pulvérisation des roches met en évidence des inclusions très petites ayant des teneurs variables et provenant sans doute de la dissociation des cristaux précédents.

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

1. KINOSHITA, S. *Proc. Roy. Soc., A*, 83, 432, 1910. REINGANUM, *Physik Z.*, 12, 1076, 1911. MUHLESTEIN, *Verh. Schweiss Narth. Ges.*, 101, 171, 1921. *Arch. Sc. Phy. et Nat.* (5), 5, 294, 1921. CHAMIE, *C.R. c. Sc.*, 184, 1943, 1937. 185, 770 et 1277, 1928. 208, 1300, 1939. 223, 854, 1946. *J. de Phys.* 10, 44, 1929. BLAU, *J. de Phys.*, 5, 61, 1934.
2. MYSSOWSKY, L. et TSCISHOW, P., *Z. Physik*, 44, 408, 1927. WALL, E. J., *Am. Photographic Publishing Comp.*, Boston, 1929. JDANOV, A., *J. Phys.*, 6, 233, 1935. *C. R. U. R. S. S.*, 20, 641, 1938. WILKINS, T. R., *J. App. Phys.*, 11, 35, 1940. WEBB, J. H., *J. App. Phys.*, 11, 18, 1940. SHAPIRO, M. M., *Rev. Mod. Phys.*, 13, 58, 1941. BAKER, *Photographic emulsion technique*, *Am. Phot. Pub. Comp.*, Boston, 1941. POWELL, C. F., *Proc. Roy. Soc., A*. 181, 344, 1943. MEES, C. E. K., *Theory of the photographic process*. The Macmillan Comp., New-York, 1948. SHEPPARD, LAMBERT, SWINEHART, *J. chem. Phys.*, 13, 372, 1945. DEMERS, P., *Can. J. of Research*, V, 25, A. 223, 1945. OCCHIALINI et POWELL, *Nuclear Physics in Photogr.*, Oxford University Press.
3. TSIEN SAN TSIANG et CUER, *Cah. de Phys.*, 14, 61, 1943. TSIEN SAN TSIANG, CHASTEL, FARAGGI, VIGNERON, *C. R. Ac. Sc.*, 223, 571, 1946.
4. M^{me} I. CURIE, *J. de Phys.*, VIII, t. VII, n° 11, 1946.

CHAPITRE I

5. R. D. EVANS, *Phys. Rev.*, 1934, 45, p. 29. FINNEY, G. D. et EVANS, R. D., *Phys. Rev.*, 1935, 48, p. 503.

CHAPITRE IV

6. BLAU et WAKEACHER, *Zwiss. Phot.*, 31, 243, 1933. BLAU, *Sitzber. Akad. Wiss. Wien, Abt.*, 2 a, 134, 63, 1921. LAUDA, *Sitz. Akad. Wien Math. Nature. Klass.*, Abt., 2 a, 145, 1935, 107.
7. YAGODA et KAPLAN, *Phys. Rev.*, 71, 1947, 910. LA PALME et DEMERS, *Phys. Rev.*, 72, 1947, 536.
8. FARAGGI et ALBOUY, *C. R. Ac. Sc.*, 226, 717, 1948.

9. OCCHIALINI et POWELL, *Nature*, 159, 1947, 186. YACODA, *Amer. Miner.*, 34, 1946, 87.
10. FARAGGI et ALBOUY, *C. R. Ac. Sc.*, 228, 1949, 68.
11. PERFILOV, *J. de Phys. U. R. S. S.*, 17, 1947, 910.
12. MATHER, K. B., *Phys. Rev.*, V, 76, n° 4, 1949, 486.
13. FARAGGI et ALBOUY, *C. R. Ac.*, 228, p. 68, 1949. *J. de Phys.*, S, VIII, t. X, n° 4, 1949.
14. PICCIOTTO, *C. R. Ac.*, 228, 173, 1949. *C. R. Ac.*, 228, 247, 1949.
15. MOTT et GURNEY, MITCHELL, 30, et *Ind. Photo*, 1948, n° 10, p. 361.
K. MEES, *The theory of photographic process*, MacMillan C°, New-York, 1943.
16. ELSTER. GEITEL.
17. EVANS, R. D., *J. App. Phys.*, 12, 297-8, 1941. *Bull. Géol. Soc. Am.*, 52, 439, 1941.
ROTHE E. et HEE A., *Ann. I. P. G.*, Strasbourg (1937), 3^e partie.
URRY, W. D., *Am. J. Sci.*, 239, 191, 1941.
JOLY, *Nature*, 109, p. 517 et 578, 1922.
18. PIGGOT, *Am. J. Soc.*, 17, p. 27, 1929.
19. GOODMAN, C., *Am. Miner.*, 25, 208, 1940.
GOODMAN, C., *Trans. Am. Geophys. Union*, 544-7, 1941.
BARANOV, V. I. et KRETSCHMER. S. I. *C. R. U. R. S. S.*, 1, p. 543, 1935.
GOODMANN, C., *J. App. Phys.*, 13. n° 5, 270, 1942.
- 19 bis. A. HEE., *C. R. Ac. Sc.*, 227, 356, 1948. *Ann. Geophys.*, IV, 3, 242, 1948. PICCIOTTO, E. E., *Bull. Soc. belge de Géologie*, t. LVIII, fasc. I, 1949. POOLE, J. H. J. et BREMNER, J. W., *Nature*, 161, 884, 1948.

CHAPITRE V

20. EVANS et GOODMAN, 1941, *Bull. Geol. Soc. of. Am.*, v. 52, p. 459.
EVANS, GOODMAN, KEEVIL, LANE et URRY, 1939, *Phys. Rev.*, v. 55, p. 931. KEEVIL, N. B., KEEVIL, A. R., INGHAM et CROMBLE, 1943, v. 241, p. 345. NIER, 1938, *J. Am. Chem. Soc.*, v. 60, p. 1571.
NIER, THOMPSON, MURPHEY, 1941, *Phys. Rev.*, v. 60, p. 112.
HOLMES, 1937, *Econ. Geol.*, v. 32, p. 763. HOLMES, 1938, *Econ. Geol.*, v. 33, p. 829. KEEVIL, 1938, *Econ. Geol.*, v. 33, p. 685.
KEEVIL, N. B., *Am. Jour. Sc.*, v. 237, p. 195.
21. KEEVIL, N. B., 1943, *Jour. Géol.*, v. 51, p. 287. KEEVIL, N. B., 1944, *Am. Jour. Sc.*, v. 242, p. 309.

CHAPITRE VI

22. M^{me} CURIE: *Radioactivité*, § 147, p. 486, Hermann, éd.
23. EVANS. *Phys. Rev.*, 1945, p. 38.
24. KEEVIL, N. B. *Am. J. Sc.*, v. 36, 5^e sér., n° 216, 1938, p. 406.

25. KEEVIL, *Am. J. of Sc.*, v. 241, n° 6, 1943, p. 345.
26. DUROCHER, *CR. Ac. Sc.*, 1850, p. 902. KERFORNE, *Bull. Soc. Géol. et Min.*, Bretagne, t. III. fasc. IV, 1922, p. 328. C^{dt} HOUSSEMAINE, *Bull. Soc. Polym.*, Morbihan, 1940, p. 20.

CHAPITRE VII

26. J. H. J. POOLE et J. W. BREMNER, *Nature*, v. 163, p. 130. Jan. 22 1949.
-

R. COPPENS. *CR. Ac. Sc.*, 227, 61, 1948. *J. de Phys.*, VIII, t. X, n° 1, 1949. *J. de Phys.*, VIII, t. X, n° 2, 1949. *CR. Ac. Sc.*, 228, 176, 1949. *Bull. Soc. Sc. Bret.*, t. XXIII, 1948. *CR. Ac. Sc.*, 228, 1218, 1949. *CR. Ac. Sc.*, 228, 1938, 1949. *CR. Ac. Sc.*, 229, 617, 1949. *CR. Ac. Sc.*, 229, 1221, 1949. *CR. Ac. Sc.*, 229, 1319, 1949. *S. de Phys.*, t. II, janv. 1950.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	217
-------------------	-----

CHAPITRE I

Calcul du nombre de rayons visibles inscrits par cm^2 et par seconde sur une émulsion photographique par un corps radioactif.

§ 1. — Nombre de rayons émis par cm^2 et par seconde par un corps radio-actif.....	221
§ 2. — Évaluation du coefficient d'absorption.....	229
§ 3. — Évaluation du rapport des concentrations en thorium et en uranium.....	230

CHAPITRE II

Expériences préliminaires.

§ 4. — Méthode générale.....	232
§ 5. — Influence de la grosseur des grains.....	233
§ 6. — Influence du temps de pose.....	234
§ 7. — Influence de l'activité du minéral.....	235

CHAPITRE III

Évaluation de la teneur en uranium et en thorium de quelques roches. Influence de cette teneur sur l'absorption.

§ 8. — Détermination du coefficient d'absorption.....	237
§ 9. — Teneurs en uranium et en thorium de quelques minerais.	242

CHAPITRE IV

Étude de la disparition de l'image latente dans la photographie des trajectoires des particules α .

§ 10. — Méthode d'évaluation de la vitesse de disparition.....	244
§ 11. — Résultats.....	245
§ 12. — Influence de la nature de la plaque.....	251
§ 13. — Influence de la température.....	253
§ 14. — Influence de l'humidité.....	253
§ 15. — Influence du borate de sodium sur la conservation de l'image latente.....	254
§ 16. Théorie de l'effacement.....	258

Étude de la radioactivité des roches.

17. Exposé des buts recherchés.....	259
-------------------------------------	-----

CHAPITRE V

Rapport des concentrations en thorium et en uranium.

§ 18. — Mesure des longueurs des trajectoires.....	261
§ 19. — Résultats.....	264

CHAPITRE VI

Teneur globale en uranium et en thorium de quelques roches.

§ 20. — Principe de la méthode.....	266
§ 21. — Détermination du nombre moyen N de trajectoires visibles émises par cm^2 et par seconde.....	266
§ 22. — Résultats.....	270

CHAPITRE VII

Étude des diverses inclusions rencontrées dans les roches étudiées.

§ 23. — Généralités.....	273
--------------------------	-----

A. — *Petites inclusions à très forte radio-activité.*

§ 24. — Origine.....	274
§ 25. — Inclusions à forte teneur en thorium.....	274
§ 26. — Inclusions à forte teneur en uranium.....	278
§ 27. — Aspect des inclusions sur la roche.....	283

B. — *Inclusions à faible teneur en uranium.*

§ 28. — Origine, dimensions et teneurs des inclusions à faible teneur en uranium.....	284
--	-----

C. — *Inclusions à faible teneur en thorium.*

§ 29. — Existence et méthode de localisation de ces inclusions...	287
§ 30. — Mesure du rapport des concentrations en thorium et en uranium	291
§ 31. — Teneur en thorium de ces inclusions.....	293
§ 32. — Répartition de la radioactivité à l'intérieur de ces cris- taux	295

CHAPITRE VIII

Répartition de la radioactivité dans quelques roches polies.

§ 33. — Granite de Bretagne.....	298
§ 34. — Granite d'Angers.....	300
§ 35. — Granite de Lignole (Morbihan) et Micaschiste de Quiberon.....	303

CHAPITRE IX

Étude des inclusions rencontrées dans les roches pulvérisées.

§ 36. — Grains radioactifs placés sur l'émulsion.....	304
§ 37. — Grains radioactifs séparés de l'émulsion par une mince couche inactive.....	307
§ 38. — Grains radioactifs à plusieurs centres d'émission.....	308

CHAPITRE X

La radioactivité du sable de la rivière de Grach (Morbihan).

§ 39. — Variation de l'activité avec la situation de la plage.....	310
§ 40. — Nature des inclusions rencontrées dans les sables.....	312
CONCLUSIONS	314
BIBLIOGRAPHIE.....	316

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

**L'âge de la terre
à l'aide des méthodes de la radioactivité.**

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 12 décembre 1949.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
A. CHATELET.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,
JEAN SARRAILH.

